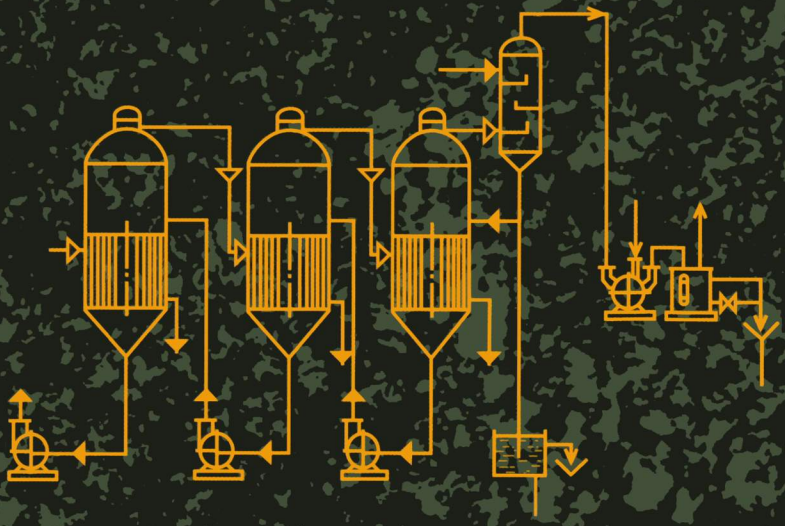
• Alfredas Balandis • Benonas Leskauskas • Stasys Šinkūnas
• Giedrius Vaickelionis • Zenonas Valančius •

CHEMIJOS INŽINERIJA

II knyga



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

Alfredas BALANDIS, Benonas LESKAUSKAS,
Stasys ŠINKŪNAS, Giedrius VAICKELIONIS,
Zenonas VALANČIUS

CHEMIJOS INŽINERIJA

II knyga

Vadovėlis

Scanned by
Cloud Dancing

TECHNOLOGIJA
KAUNAS • 2007

Lietuvos Respublikos švietimo ir mokslo ministerijos Aukštųjų mokyklų bendrųjų vadovėlių leidybos komisijos rekomenduota 2006-12-15, Nr. 07-306.

Išleista Švietimo ir mokslo ministerijos lėšomis

Recenzavo:
vyr. m. b. dr. A. Kukliauskas (Lietuvos energetikos institutas)
vyr. m. b. dr. R. Levinskas (Lietuvos energetikos institutas)

Moksliniai ekspertai:
prof. habil. dr. V. Zabukas (Klaipėdos universitetas)
prof. habil. dr. R. Makuška (Vilniaus universitetas)

Šio vadovėlio rengimą rėmė Lietuvos valstybinis mokslo ir studijų fondas

Be raštiško leidyklos „Technologija" sutikimo nė viena šios knygos dalis jokiais tikslais ir jokiomis priemonėmis neturi būti kopijuojama

© A. Balandis, B. Leskauskas, S. Šinkūnas, G. Vaickelionis, Z. Valančius, 2007
© Leidykla „Technologija", 2007

ISBN 978-9955-25-397-6 (2 knyga)

TURINYS

Įvadas 8
12 dalis. Šilumos pernašos procesai 9
12.1. Šiluminių procesų charakteristika. Energijos balansas 9
12.2. Šilumos laidumas 14
12.2.1. Temperatūros laukas ir gradientas 14
12.2.2. Furjė dėsnis 15
12.2.3. Diferencialinė šilumos laidumo lygtis 17
12.2.4. Plokščios sienelės šilumos laidumas 21
12.2.5. Cilindrinės sienelės šilumos laidumas 24
12.3. Konvekcinė šilumos pernaša 26
12.3.1. Konvekcinės šilumos pernašos panašumo kriterijai ir lygtys 26
12.3.2. Šilumos atidavimas esant priverstiniam fluido tekėjimui kanalais 36
12.3.3. Šilumos atidavimas esant išoriniam lygių ir briaunotų vamzdžių aptekėjimui 39
12.3.4. Šilumos atidavimas fluidui išilgai aptekant plokščią sienelę 45
12.3.5. Šilumos atidavimas esant gravitaciniam skysčių tekėjimui.. 46
12.3.6. Šilumos atidavimas esant natūraliai fluido konvekcijai 48
12.3.7. Šilumos atidavimas kondensuojantis garams 51
12.3.8. Šilumos atidavimas skysčiams verdant 55
12.3.9. Šilumos atidavimas maišant skysčius maišikliais 64
12.4. Šilumos pernaša spinduliuote 64
12.4.1. Sąvokos ir apibrėžimai 64
12.4.2. Pagrindiniai spinduliuotės dėsniai 66
12.4.3. Kietų kūnų tarpusavio spinduliuotė 68
12.4.4. Liepsnos spinduliuotė. Radiacinės spinduliuotės degimo kamerose ypatumai 72
12.4.5. Šilumos atidavimas spinduliuote 76
12.5. Nuostovusis šilumos perdavimas 76
12.5.1. Šilumos perdavimas per plokščią sienelę 76
12.5.2. Šilumos perdavimas per cilindrinę sienelę 79
12.5.3. Bendra šilumos ir masės pernaša 82
12.5.4. Šilumos perdavimas per briaunotus paviršius 83
12.6. Šilumos pernašos procesų varos jėga 85

12.6.1. Šilumos pernašos procesų varos jėga ir fluidų tarpusavio judėjimo schemos 85
12.6.2. Grafinis ir analitinis mišrių daugiaėjų ir susikertančiųjų srovių Δt_m nustatymas 91
12.6.3. Šilumokaičių efektyvumo skaičiavimas 94
12.6.4. Kai kurių tipinių šilumokaičių efektyvumas 95
12.6.5. φ srovių metodas šilumokaičio efektyvumui apskaičiuoti 97
13 dalis. Šildymas, aušinimas, kondensacija 99
13.1. Šildymas 99
13.1.1. Šildymo būdai 100
13.1.2. Šilumokaičiai 105
13.1.3. Šilumokaičių skaičiavimas 113
13.2. Aušinimas 120
13.3. Kondensacija 121
13.3.1. Kondensatoriai 122
14 dalis. Šaldymas 131
14.1. Saikingasis šaldymas 133
14.2. Gilusis šaldymas 144
15 dalis. Garinimas 153
15.1. Garinimo proceso teoriniai pagrindai 153
15.2. Garintuvų skaičiavimas 159
15.3. Garinimo būdai. Garinimo proceso principinės schemos 162
15.4. Garintuvai su šiluminiu siurbliu 170
15.5. Garintuvų konstrukcija ir eksploatavimas 172
16 dalis. Masės mainų procesai ir aparatai 185
16.1. Masės perdavimo procesai sistemose su paslankiomis fazes skiriančių paviršių ribomis 189
16.2. Masės mainų proceso medžiagų balansas 191
16.3. Molekulinė difuzija 194
16.4. Konvekcija ir masės atidavimas 195
16.5. Diferencialinės masės pernašos proceso lygtys 200
16.6. Masės mainų procesų panašumas 202
16.7. Masės mainų procesų varos jėga 204
16.8. Masės mainų aparatų skaičiavimo pagrindai 206
16.8.1. Masės mainų aparato skersmens skaičiavimas 207
16.8.2. Masės mainų aparato aukščio skaičiavimas 207
17 dalis. Absorbcija 227
17.1. Dujų ir skysčio sistemos fazių pusiausvyra 228
17.2. Daugiakomponenčių mišinių absorbcija 234
17.3. Absorbcijos kinetika 236
17.4. Absorberių konstrukcija ir veikimo principas 239
17.4.1. Plėveliniai absorberiai 239

17.4.2. Įkrautiniai absorberiai 242
17.4.3. Lėkštiniai absorberiai 252
17.4.4. Purkštuviniai absorberiai 261
17.5. Absorberių palyginimas 264
17.6. Absorberių skaičiavimas 265
17.6.1. Plėvelinių absorberių skaičiavimas 266
17.6.2. Įkrautinių absorberių skaičiavimas 269
17.6.3. Lėkštinių absorberių skaičiavimas 271
17.7. Desorbcija 275
17.8. Absorbcijos schemos 277
18 dalis. Distiliacija ir rektifikacija 279
18.1. Skysčio ir garų sistemų pusiausvyra 281
18.2. Distiliacija 288
18.3. Nuolatinė rektifikacija 294
18.3.1. Rektifikacijos įrenginiai 295
18.3.2. Rektifikacijos kolonų darbo analizė ir jų skaičiavimas 298
18.4. Periodinė rektifikacija 308
18.5. Ekstrakcinė ir azeotropinė rektifikacija 313
18.6. Rektifikacijos aparatų skaičiavimo ypatumai 315
18.7. Daugiakomponenčių mišinių rektifikacijos skaičiavimas 316
18.7.1. Ištisinio laistymo ($R \to \infty$) rektifikacijos proceso skaičiavimas 318
18.7.2. Rektifikacijos proceso skaičiavimas nuoseklių priartėjimų (nuo lėkštės prie lėkštės) metodu 322
19 dalis. Ekstrakcija 325
19.1. Ekstrakcijos proceso fizikiniai pagrindai 325
19.2. Sistemos *skystis-skystis* pusiausvyra 327
19.3. Ekstrahento parinkimas 331
19.4. Ekstrakcijos proceso medžiagų balansas 332
19.5. Ekstrakcijos iš skysčių kinetika 334
19.6. Pagrindiniai ekstrakcijos būdai 335
19.7. Ekstraktorių konstrukcija ir veikimo principas 339
19.8. Ekstraktorių skaičiavimas 348
19.8.1. Pakopinių ekstraktorių skaičiavimas 348
19.8.2. Diferencialinių-kontaktinių ekstraktorių skaičiavimas 354
19.9. Ekstrakcijos technologinės schemos 358
20 dalis. Skysčio, dujų arba garų ir kietojo kūno tarpusavio masės mainai 359
20.1. Masės pernaša išorinėje fazėje 359
20.2. Masės pernaša kietojoje fazėje 361
21 dalis. Adsorbcija ir jonų mainai 371
21.1. Adsorbcija 372

21.1.1. Pagrindiniai pramoniniai adsorbentai ir jų savybės 372
21.1.2. Adsorbcijos pusiausvyra 374
21.1.3. Adsorbcijos medžiagų balansas 378
21.1.4. Adsorbcijos kinetika 379
21.2. Adsorberiai 385
21.2.1. Adsorberių konstrukcija ir veikimo principas 385
21.2.2. Adsorberių skaičiavimas 389
21.3. Desorbcija 390
21.4. Jonų mainai 392
22 dalis. Tirpimas ir ekstrahavimas iš kietųjų kūnų 395
22.1. Tirpimas 396
22.2. Ištirpusios medžiagos ekstrakcija 400
22.3. Kietosios medžiagos ekstrakcija 404
22.4. Ekstrakcijos ir tirpimo metodai 406
22.5. Ekstraktorių ir tirpinimo aparatų konstrukcija ir veikimo principas 407
23 dalis. Kristalizacija 411
23.1. Kristalizacijos proceso fizikiniai pagrindai ir kristalizatorių skaičiavimas 411
23.1.1. Kristalizacijos pusiausvyra 413
23.1.2. Kristalizacijos proceso medžiagų ir šilumos balansai 415
23.2. Kristalizacijos kinetika 417
23.4. Mišinių perskyrimas kristalizuojant 419
23.5. Kristalizatorių konstrukcija ir veikimo principas 425
23.6. Lydinių kristalizacija 433
24 dalis. Membraniniai procesai 437
24.1. Membranos 439
24.1.1. Sutankinamosios membranos 440
24.1.2. Kietos struktūros membranos 443
24.1.3. Skystosios membranos 445
24.2. Fizikiniai cheminiai membraninių procesų pagrindai 446
24.2.1. Baromembraniniai procesai 447
24.2.2. Difuziniai membraniniai procesai 450
24.2.3. Elektromembraniniai procesai 453
24.3. Termomembraniniai procesai 455
24.4. Membraniniai aparatai 455
24.5. Membraninių procesų ir aparatų skaičiavimai 462
24.5.1. Baromembraninių procesų medžiagų balansas 462
24.5.2. Membranų paviršiaus skaičiavimas 463
24.5.3. Koncentracinės poliarizacijos skaičiavimai 465
24.5.4. Kaskadinės membraninių elementų schemos 467
24.6. Membranų valymo būdai 474

25 dalis. Džiovinimas 475
25.1. Džiovinimo proceso teorijos pagrindai 475
25.2. Džiovinamos medžiagos pusiausvyros būsenos charakteristikos 480
25.3. Drėgno oro parametrai 487
25.4. Drėgno oro h–x diagrama 489
25.5. Džiovinimo proceso vaizdavimas h–x diagramoje 492
25.6. Džiovinimo proceso medžiagų ir šilumos balansai 494
25.7. Džiovinimo kinetika 499
25.8. Džiovinimo schemos 501
25.9. Džiovyklos 506
25.9.1. Konvekcinės džiovyklos 506
25.9.2. Kontaktinės džiovyklos 516
25.9.3. Specialios paskirties džiovyklos 518
25.10. Džiovyklų energinio efektyvumo padidinimo būdai 520
LITERATŪRA 525
DALYKINĖ RODYKLĖ 526

ĮVADAS

Antroji „Chemijos inžinerijos" vadovėlio knyga, kaip ir pirmoji, skirta universitetinėms chemijos inžinerijos studijoms. Pirmojoje knygoje pateikti bendrieji tvermės, pusiausvyros, impulso, energijos ir masės pernašos dėsningumai, cheminės technologijos procesų modeliavimo principai, hidrodinaminė srautų struktūra, išnagrinėti hidrostatiniai, hidrodinaminiai ir hidromechaniniai procesai (skysčių maišymas ir maišymas skysčiuose, skysčių transportavimas, dujų suslėgimas ir transportavimas, nevienalyčių sistemų perskyrimas) ir aparatai. Paskutinė, vienuoliktoji, dalis skirta mechaniniams procesams: smulkinimui, birių medžiagų klasifikacijai, transportavimui, birių ir plastiškų medžiagų maišymui, granuliavimui ir presavimui.

Antrojoje knygoje nagrinėjami šilumos ir masės mainų procesai ir jiems atlikti naudojami aparatai. Knygą sudaro 10 dalių. Kadangi dalių numeracija bendra abiem knygoms, tai antroji knyga pradedama dvyliktąja dalimi, kurioje nagrinėjami šilumos mainų procesų teoriniai pagrindai. Nuo 13-osios iki 15-osios dalių imtinai trumpai aptariami konkretūs, dažniausiai technologiniuose procesuose naudojami šiluminiai procesai: šildymas, aušinimas, kondensacija, garinimas ir šaldymas. Kitose dalyse nagrinėjami masės mainų procesai. Šešioliktojoje ir dvidešimtojoje dalyse pateikti visos grupės gimininių procesų bendri fizikiniai masės mainų pagrindai. Kitur nagrinėjami konkretūs masės mainų procesai: absorbcija, distiliacija ir rektifikacija, ekstrakcija, adsorbcija ir jonų mainai, tirpimas ir ekstrakcija iš kietųjų medžiagų, kristalizacija, membraniniai procesai, džiovinimas. Kalbant apie konkrečius procesus, kaip ir pirmojoje knygoje, nurodoma ne tik jų paskirtis, naudojimo sritys, bet ir proceso mechanizmas, statika, kinetika, pateikiami aparatai, kuriuose vykdomi nagrinėjamieji procesai, trumpai paaiškinamas jų skaičiavimas.

Kaip ir pirmojoje knygoje, aparatų konstrukcija pateikiama schemiškai, be neesminių chemijos inžinerijos požiūriu elementų, jų darbas aprašomas glaustai. Pagrindinis tikslas – pateikti studentams aparatų, kuriuose vykdomas analizuojamasis procesas, darbo principo aprašymą ir minimalių dalinių praktinių rekomendacijų, todėl tikimės, kad knyga bus naudinga ne tik studentams, bet ir jau dirbantiems chemikams technologams. Smulkiau apie nagrinėtų aparatų konstrukcijas ir skaičiavimus rašoma literatūros sąrašuose nurodytuose šaltiniuose arba specialybių technologijų ir įrenginių vadovėliuose.

Rengiant knygos dvyliktąją dalį – šilumos mainų procesų teorinius pagrindus – daug dirbo buvęs ilgametis KTU Šiluminės energetikos katedros docentas dr. R. Makaveckas. Labai gaila, kad negailestingas likimas neleido jam užbaigti pradėto darbo.

Autoriai dėkingi visiems, kurie konkrečiu darbu arba patarimais prisidėjo rengiant ir leidžiant šį vadovėlį: recenzentams technikos mokslų daktarams A. Kukliauskui ir R. Levinskui (Lietuvos energetikos institutas), moksliniams ekspertams prof. habil. dr. V. Zabukui (Klaipėdos universitetas) ir prof. habil. dr. R. Makuškai (Vilniaus universitetas). Taip pat dėkojame chemijos mokslų dr. J. Motuzui, daug pagelbėjusiam rašant membraninių procesų dalį.

12 DALIS

ŠILUMOS PERNAŠOS PROCESAI

12.1. Šiluminių procesų charakteristika. Energijos balansas

Dauguma cheminės ir maisto produktų technologijos procesų norima kryptimi vyksta tik esant tam tikrai temperatūrai, kuri pasiekiama tiekiant arba šalinant šilumą.

Šiluminiais procesais vadiname tokius technologinius procesus, kurių sparta yra sąlygojama šildymo ar aušinimo bei fazinių virsmų greičių. Šiems procesams vykdyti naudojami aparatai vadinami šilumos mainų aparatais, šilumokaičiais arba šilumą naudojančiais aparatais.

Terminis cheminių medžiagų apdorojimas dažniausiai yra sudėtingas procesas: jo metu kinta medžiagos sandara arba fazinė būsena ir masė; be to, kiekvienas terminis apdorojimas visada susijęs su šilumos tiekimu ir atidavimu. Taigi, bendriausi šiluminiai chemijos pramonės procesai yra šildymas, aušinimas, garinimas, kondensacija ir šaldymas.

Medžiagoms šildyti ir aušinti naudojamos darbinės medžiagos: degimo dujos, oras, vanduo ar kiti skysčiai bei jų garai, taip pat elektra.

Medžiagų šildymo ir aušinimo procesus, kurie vyksta tarp darbinės ir apdorojamosios medžiagų, įprasta vadinti *šilumos atidavimo procesais*, o tokie procesai, kai darbinė medžiaga yra atskirta nuo apdorojamosios ir jos šiluma perduodama per sienelę, vadinami *šilumos perdavimo procesais.*

Kadangi chemijos pramonėje labai dažnai apdorojamos skystos medžiagos, – virinamos, garinamos, kondensuojamos, tai, be bendrųjų šildymo, aušinimo bei šaldymo procesų, šioje knygoje dar nagrinėjamas garinimas ir kondensacija.

Dažniausiai naudojami šiluminiai procesai yra medžiagų *šildymas* (jų temperatūros didinimas), *aušinimas* (jų temperatūros mažinimas), *kondensacija* (garų vertimas skysčiu), *garinimas* (skysčių vertimas garais). Atskirais atvejais garinimo tikslas yra nelakių medžiagų koncentravimas tirpale, išgarinant dalį lakesniųjų medžiagų (tirpiklio).

Šiluminiuose procesuose tarpusavyje sąveikauja ne mažiau kaip dvi skirtingos temperatūros medžiagos; šiame sąveikos procese savaime (be energijos

kompensacijos) šiluma teka nuo aukštesnės temperatūros medžiagos (vadinamos *šildalu*) į žemesnės temperatūros medžiagą (vadinamos *šaldalu* arba *šaldymo medžiaga*).

Technologiniai šiluminiai procesai vyksta, esant įvairioms temperatūroms, – nuo beveik absoliutaus nulio iki kelių tūkstančių laipsnių. Kiekvienam konkrečiam procesui parenkamos tinkamos darbinės medžiagos, šildalai ir šaldalai. Darbo sąlygomis jie turi būti chemiškai stabilūs ir lengvai tekėti vamzdžiais, iš jų ant aparatų sienelių neturi iškristi nuosėdų ir sukelti jų korozijos.

12.1 lentelėje parodyti labiausiai paplitę šilumnešiai, šildalai ir šaldalai. Ten pat nurodytos jų naudojimo temperatūros ribos.

12.1 lentelė. Paplitę šilumnešiai: šildalai ir šaldalai

Šilumnešiai (šildalai, šaldymo medžiagos)	Darbo sąlygos	
	temperatūra, °C	slėgis, MPa
a) šildalai:		
Oras	nuo -70 iki 200	nuo 0,1 iki 1,0
Tepalai	nuo 0 iki 215	iki 0,1
Difenilas, difeniloksidai, mišiniai	nuo 260 iki 350	nuo 0,1 iki 0,6
Silikonai	320	0,1
Vanduo	nuo 0 iki 100	0,1
Perkaitintasis vanduo	nuo100 iki 374	nuo 0,1 iki 22,5
Sotieji vandens garai	nuo 100 iki 250	nuo 0,1 iki 4
Dūmai arba kūryklų dujos (kuro degimo produktai)	nuo 450 iki 1200	0,1
Įkaitintos ugniai atsparios medžiagos (šamotas, dinasas, chromitinės bei forsteritinės ugniai atsparios medžiagos ir kt.)	iki 1500	0,1
Įkaitintos ugniai atsparios medžiagos (korundinės, grafitinės ir kt.)	nuo 2000 iki 3000	0,1
Žemos temperatūros plazma	iki 3500	0,1
b) šaldalai:		
Skystas azotas, deguonis, oras	iki -210	iki 20
Skystas metanas	nuo -100 iki -160	iki 4
Skystas etanas, etilenas, freonai	nuo -70 iki -150	iki 4
Freonai, F12, F22, F134a, F123, F152	nuo -70 iki 0	1,5
Skysta angliarūgštė, sieros dvideginis SO_2	nuo -70 iki 0	1,5
Etilenglikolis	nuo 0 iki -65	0,1
NaCl tirpalas (šaldalas)	nuo 0 iki -20	0,1
$CaCl_2$ tirpalas (šaldalas)	nuo 0 iki -50	0,1

Dažniausiai kaip šilumnešis naudojami vandens garai, karštas ir šaltas vanduo, kūryklų dujos, oras. Išskyrus kūryklų dujas, jie yra lengvai gaunami ir netoksiški.

Kiekvieno šiluminio proceso pagrindinė charakteristika yra *perduotos šilumos kiekis, J.* Nuo šio dydžio priklauso šilumokaičių matmenys. Svarbiausias šilumokaičio parametras – *šilumos perdavimo paviršiaus plotas, m^2.*

Pagrindinė kinetinė šilumos perdavimo lygtis nusako šilumos pernašos proceso intensyvumą arba greitį, nustato ryšį tarp perduoto šilumos kiekio ir šilumos pernašos paviršiaus ploto. Ji užrašoma taip:

$$dQ = k_v \cdot \Delta t \cdot dF \cdot d\tau ; \qquad (12.1)$$

čia dQ – perduotas šilumos kiekis, J; k_v – vidutinis vieno šilumnešio šilumos perdavimo kitam koeficientas, W/(m^2·K); Δt – šilumnešių temperatūros skirtumas, °C; dF – šilumos pernašos paviršiaus plotas, m^2; $d\tau$ – šilumos pernašos trukmė, s.

Kai procesas nuostovusis, pagrindinė šilumos perdavimo lygtis užrašoma taip:

$$Q = k \cdot \Delta t_{vid} \cdot F ; \qquad (12.2)$$

čia Q – perduodamos šilumos srautas, W; k – vieno šilumnešio šilumos perdavimo kitam koeficientas, W/(m^2·K); Δt_{vid} – vidutinis šilumnešių temperatūrų skirtumas, °C; F – šilumos perdavimo paviršiaus plotas, m^2.

Iš (12.2) lygties apskaičiuojamas F, kai žinoma Q, k, Δt_{vid}.

Per šilumos pernašos paviršių perduotas šilumos srautas Q apskaičiuojamas pagal toliau pateikiamą proceso šilumos balanso lygtį.

Vidutinis šilumnešių temperatūrų skirtumas Δt_{vid} nustatomas žinant jų pradines ir galines temperatūras ir šilumnešių tarpusavio judėjimo schemą.

Šilumos perdavimo koeficientas – šilumos pernašos proceso greičio rodiklis. Skaičiuojant šilumos pernašos procesus jį nustatyti sunkiausia. Jis priklauso nuo šilumos pernašos sąlygų, nuo šilumos plitimo būdų, šilumnešių šiluminių bei fizikinių savybių, judėjimo greičių, geometrinių paviršių formų, konstrukcijos ir kt.

Tiriant šilumos perdavimą, reikia nustatyti vidutinį temperatūrų skirtumą ir šilumos perdavimo koeficientą. Tyrimais įrodyta, kad šilumos perdavimas yra sudėtingas šiluminis procesas, todėl jis skirstomas į paprastesnius, elementarius procesus.

Šiluma dažniausiai plinta *laidumu, konvekcija* ir *šilumine spinduliuote.*

Šilumos laidumas yra šiluminės energijos sklidimas medžiagoje dėl mikrodalelių (molekulių, atomų, elektronų) judėjimo. Intensyviau judančios dalelės susidurdamos dalį savo energijos atiduoda mažiau jos turinčioms dalelėms. Šilumos pernašos laidumu mechanizmas yra molekulinis. Turbulentiškai ju-

dančiose terpėse – skystyje arba dujose, kai šiluma perduodama konvekciniu būdu, molekulinis šilumos pernešimo plonuose prie kieto paviršiaus esančiuose nejudančiuose pasienio sluoksniuose mechanizmas, t. y. laidumas, turi didelę įtaką. Laminarinio tekėjimo sraute arba nejudančiame skystyje, taip pat kietuosiuose kūnuose šilumos laidumas gali būti pagrindinis šilumos pernešimo būdas. Kadangi šilumos laidumas yra molekulinis reiškinys, tai šilumos pernašos laidumu greitis priklauso nuo medžiagos struktūros ir savybių, pvz., skysčių arba dujų klampos, tankio ir kt.

Konvekcinė šilumos pernaša susijusi su medžiagos judėjimu. Tekanti medžiagos masė, judančios ir besimaišančios jos makrodalelės kartu perneša ir šilumą. Medžiaga gali judėti natūraliai ir priverstinai.

Natūralusis judėjimas yra toks, kai medžiaga juda dėl nevienodai įšilusios (nevienodo tankio) masės, o priverstinis – kai takioji medžiaga transportuojama siurbliais ir ventiliatoriais. Atitinkamai konvekcinė šilumos pernaša skirstoma į *natūraliąją* ir *priverstinę* konvekciją. Konvekcinei šilumos pernašai daug įtakos turi skysčių ir dujų judėjimo pobūdis. Tačiau ir judančiame skystyje arba dujose susidaro temperatūros gradientas, kuriam esant šiluma iš aukštesnės temperatūros zonos į žemesnės temperatūros zoną sklinda laidumu. Taigi konvekciją visada lydi šilumos pernaša laidumu.

Šiluminė spinduliuotė (radiacija) – tai šiluminės energijos pernaša infraraudonųjų spindulių diapazono (0,4...40 μm) elektromagnetinėmis bangomis. Tokiam šilumos sklidimui nereikalinga tarpinė medžiaga, šiluma gali būti spinduliuojama ir sklisti net beorėje erdvėje. Šilumos perdavimas spinduliuote susijęs su dviguba šiluminės energijos transformacija: pirma įkaitusiame kūne šiluma virsta spindulių energija ir erdvėje sklinda suaktyvintos medžiagos mikrodalelės, kurios, pereidamos į normalią energinę būseną, išskiria energijos perteklių – kvantus, antra, elektromagnetinės bangos suaktyvina apšvitinamosios medžiagos mikrodaleles, su kuriomis susiduria. Savo kelyje sutikusi kokį nors kūną spindulinė energija iš dalies virsta šiluma ir susigeria į jį, iš dalies nuo jo atsispindi, o iš dalies pereina per jį.

Tokie šilumos sklidimo būdai retai pasitaiko grynu pavidalu, jie vyksta kartu vienas po kito ir sudaro *sudėtingą šilumos pernašą*. Pvz., perduodant šilumą nuo vienos medžiagos kitai per sienelę, šilumos pernaša nuo šiltos medžiagos sienelei ir nuo sienelės šaltesnei medžiagai vyksta konvekcija, o per kietą sienelę šiluma sklinda laidumu. Kitas pavyzdys – liepsnos fakelas šilumą teikia sienelei arba labai įkaitę šiluminių įrenginių paviršiai šilumą atiduoda konvekcijos ir spinduliavimo būdu.

Aptarkime šilumos pernašos proceso šilumos balanso sudarymą. Galimi tokie atvejai:

1. Abi procese dalyvaujančios takiosios medžiagos – šilumnešiai arba fluidai nekeičia savo fazinės būsenos. Tuo atveju, palyginę į nuostoviojo ši-

lumos pernašos proceso aparatą įtekančius ir iš jo ištekančius šiluminės energijos srautus bei atsižvelgdami į šilumos nuostolių į aplinką srautą, gausime:

$$Q = G_1 \cdot c_{p_1} \cdot (t_1' - t_1'') \cdot \eta_{šk} = G_2 \cdot c_{p_2} \cdot (t_2'' - t_1'); \qquad (12.3)$$

čia G_1, G_2 – karštojo ir šaltojo šilumnešių masės debitai, kg/s; c_{p_1}, c_{p_2} – atitinkamos šilumnešių savitosios izobarinės šiluminės talpos, kJ/(kg·K); t_1', t_1'' – įtekančio ir ištekančio karštojo šilumnešio temperatūros, °C; t_2', t_2'' – atitinkamos šaltojo šilumnešio temperatūros, °C; η_{sk} – šilumokaičio nuostolius į aplinką įvertinantis naudingumo koeficientas; $(1-\eta_{sk})$ – dalis energijos, lygi nuostolių į aplinką srautui. Paprastai $\eta_{sk} = 0{,}97...0{,}99$.

Šiluminė talpa yra kaitinamos medžiagos savybė sukaupti šilumą, o aušinamos – ją atiduoti. Medžiagos šiluminę talpą apibūdinantis dydis yra jos *savitoji šiluma c*.

Savitoji šiluma – tai šilumos kiekis, J , kurio reikia medžiagos vienetinio kiekio (kg, m^3, kmol) temperatūrai padidinti vienu laipsniu.

Savitoji šiluma, nustatyta esant pastoviam tūriui, vadinama *izochorine* ir žymima simboliu c_v, o nustatyta esant pastoviam slėgiui, – *izobarine* c_p.

Nustatant šilumnešių savitųjų šilumų c_{pi} priklausomybę nuo temperatūros nagrinėjamuose temperatūrų intervaluose, imamos vidutinės jų vertės.

Skaičiavimuose patogiau imti ne savitąsias šilumas, o pilnutines masės srautų šilumines talpas. Jos dar vadinamos vandens ekvivalentais ir žymimos W_i.

Pažymėję $W_1 = G_1 \cdot c_{p_1}$ ir $W_2 = G_2 \cdot c_{p_2}$, (12.3) lygtį perrašome taip:

$$Q = W_1 \cdot (t_1' - t_1'') \cdot \eta_{sk} = W_2 \cdot (t_2'' - t_1''). \qquad (12.3a)$$

Jei tarsime, kad $\eta_{sk} = 1{,}0$ (šilumos nuostoliai į aplinką neskaičiuojami), tai iš (12.3a) lygties galėsime išvesti lygtį

$$\frac{t_1' - t_1''}{t_2'' - t_2'} = \frac{W_2}{W_1}. \qquad (12.3b)$$

Abiejų šilumnešių temperatūrų skirtumai atvirkščiai proporcingi jų vandens ekvivalentams.

2. Cheminėje technologijoje plačiai paplitę garų kondensacijos ir skysčių garavimo procesai. Jie vyksta esant pastoviai fazinio virsmo temperatūrai. Užrašykime šių procesų šilumos balansų lygtis.

a) Jei šildantysis arba karštasis šilumnešis yra garai, kurių kondensacijos metu išsiskyrusi šiluma atiduodama šildomajam, arba šaltajam, šilumnešiui, tuomet balanso lygtis užrašoma taip:

$$Q = G_1 \cdot (h_1 - c_k \cdot t_s) \cdot \eta_{sk} = G_2 \cdot c_{p_2} \cdot (t_2'' - t_2'); \qquad (12.3c)$$

čia G_1 – susikondensavusių garų debitas, kg/s; c_k – kondensato savitoji šiluma, kJ/(kg·K); t_s – kondensacijos temperatūra, priklausanti nuo garų slėgio $t_s = t(p)$, °C; h_1 – besikondensuojančių garų entalpija, kJ/kg.

b) Kai skystis G_2 garuoja ir aušina susikondensavusius garus G_1, tokio proceso šilumos balansas

$$Q = G_1 \cdot c_{p_1} \cdot (t_1' - t_1'') \cdot \eta_{sk} = G_2 \cdot (h_2 - c_{p_2} \cdot t_2'); \qquad (12.3d)$$

čia h_2 – susidariusių garų entalpija, kJ/kg.

c) Kai garų kondensacijos metu susidariusi šiluma garina kitą skystį, nekeisdami žymėjimų, gausime:

$$Q = G_1 \cdot (h_1 - c_k \cdot t_s) \cdot \eta_{sk} = G_2 \cdot (h_2 - c_{p_2} \cdot t_2'). \qquad (12.3e)$$

Visose lygtyse Q – perduotos šilumos srautas, kW.

12.2. Šilumos laidumas

12.2.1. Temperatūros laukas ir gradientas

Šiluma sklinda kūne arba aplinkoje, kai temperatūros atskiruose jų taškuose yra nelygios. Bendruoju atveju kūno bet kurio taško temperatūra kiekvienu laiko momentu τ išreiškiama funkcija

$$t = f(x, y, z, \tau);$$

čia t – nagrinėjamojo taško temperatūra; x, y, z – taško koordinatės; τ – laikas.

Temperatūros laukas – visų tiriamosios medžiagos arba kūno taškų momentinių temperatūrų visuma.

Kadangi t yra skaliarinis dydis, tai ir temperatūrų laukas skaliarinis.

Jei temperatūra laikui bėgant nekinta ($\frac{\partial t}{\partial \tau} = 0$), to kūno temperatūros laukas ir šiluminis režimas (ar būsena) vadinamas *stacionariuoju,* arba nuostoviuoju, o jei temperatūra laikui bėgant kinta, laukas ir šiluminis režimas yra *nestacionarusis*, arba nenuostovusis. Praktikoje, be trimačių temperatūros laukų, susiduriame su dvimačiais ir vienmačiais laukais, kai temperatūra kinta tik dviejų arba vienos koordinatės kryptimi.

Nuostovusis trimatis temperatūros laukas

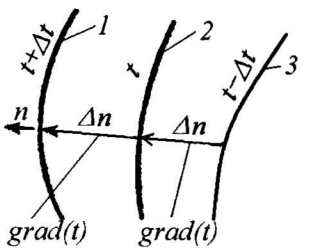
$t = f(x,y,z)$.

Nuostovusis dvimatis temperatūros laukas

$t = f(x,y)$.

Nuostovusis vienmatis temperatūros laukas

$t = f(x)$.



12.1 pav. Izoterminiai paviršiai (*1, 2, 3*) ir temperatūros gradientas

Geometrinė vieta taškų, kurių temperatūros tam tikru momentu yra vienodos (12.1 pav., *1, 2, 3*), *vadinama izoterminiu paviršiumi*. Pereinant nuo vieno paviršiaus prie kito, temperatūros lauko temperatūra kinta; izoterminio paviršiaus normalės kryptimi temperatūros pokytis būna didžiausias. Temperatūros kitimui nusakyti naudojamas temperatūros gradientas.

Temperatūros pokyčio Δt ir atstumo Δn tarp izoterminių paviršių normalės n kryptimi santykio riba, kai $\Delta n \to 0$, vadinama *temperatūros gradientu* ir žymima *grad(t)*, K/m:

$$grad\,(t) = \lim_{\Delta n \to 0} (\Delta t / \Delta n) = \partial t / \partial n. \qquad (12.4)$$

Šilumos sklidimo kryptis priklauso nuo temperatūros kitimo. Iš fizikos kurso žinome, kad šiluma sklinda temperatūros mažėjimo kryptimi.

Kūno, kuris, atiduodamas šilumą aplinkai, aušta, trimačiame temperatūros lauke galima išskirti vienodos temperatūros taškus, kurių visuma sudarys izoterminius paviršius. Juos perkirtę vertikalia plokštuma, gausime koncentrines uždaras linijas – izotermas, kurios niekada negali susikirsti, nes negali būti tokio materialaus taško, kuris tuo pačiu metu turėtų dvi skirtingas temperatūras. Iš to darome išvadą, kad kūno temperatūra gali kisti tik izoterminių paviršių kertamosios kryptimi, o intensyviausiai – statmenai šiems paviršiams.

Grafiškai temperatūros gradientas reiškia vektorių, statmeną izoterminiam paviršiui ir nukreiptą didėjančios temperatūros linkme (12.1 pav.).

12.2.2. Furjė dėsnis

Remdamasis šilumos laidumo proceso kietuosiuose kūnuose stebėjimais, Ž. Furjė suformulavo *pagrindinį šilumos laidumo* dėsnį. Pagal jį šilumos kiekis dQ, pernešamas šilumos laidumo procese, proporcingas temperatūros gra-

dientui ($\partial t / \partial n$), trukmei $d\tau$ ir šilumos srauto plitimui statmeno skerspjūvio plotui dF:

$$dQ = -\lambda \cdot (\partial t / \partial n) \cdot dF \cdot d\tau . \qquad (12.5)$$

Per sekundę perduotas šilumos kiekis vadinamas šilumos srautu Q ir matuojamas vatais, W. Vieno kvadratinio metro skerspjūvio šilumos srautas vadinamas šilumos srauto tankiu q, W/m^2:

$$q = \frac{Q}{F} = -\lambda \cdot grad(t) = -\lambda \cdot \frac{\partial t}{\partial n}; \qquad (12.5a)$$

čia Q – šilumos kiekis, J; λ – medžiagos šiluminio laidžio koeficientas, W/(m·K); F – srauto skerspjūvio plotas, m^2; *grad(t)* – temperatūros gradientas, K/m. Minuso ženklas rodo, kad šilumos judėjimo kryptis yra priešinga *grad (t)* krypčiai.

Šioje lygtyje proporcingumo koeficientas λ, vadinamas šiluminio laidžio koeficientu, rodo kūno gebėjimą praleisti šilumą. Jo matavimo vienetas yra W/(m·K):

$$[\lambda] = [\frac{dQ}{\frac{\partial t}{\partial n} \cdot dF \cdot d\tau}] = [\frac{J}{\frac{K}{m} \cdot m^2 \cdot s}] = [\frac{W}{m \cdot K}] .$$

Šiluminio laidžio koeficientas rodo, koks šilumos kiekis, J, per 1 s prateka per 1 m^2 paviršiaus ploto, kai 1 m kūno storyje temperatūra pakinta vienu laipsniu.

Medžiagų šiluminio laidžio koeficientas λ, W/(m·K), priklauso nuo jų cheminės kilmės, fazinės būsenos ir smarkiai svyruoja: dujų – 0,005...0,5, skysčių – 0,08...0,7, izoliacinių ir statybinių medžiagų – 0,02...3, metalų – 2,3...460. Metalų, naudojamų cheminės technologijos aparatūrai gaminti, šiluminio laidžio koeficientai λ yra tokie, W/(m·K): nerūdijančiojo plieno – 14...23, švino – 35, anglinio plieno – 45, nikelio – 58, ketaus – 63, aliuminio – 204, vario – 384, sidabro – 458.

Tyrimais nustatyta, kad daugumos medžiagų koeficiento λ priklausomybę nuo temperatūros galima išreikšti tokia lygtimi:

$$\lambda = \lambda_0 (1 \pm b \cdot t); \qquad (12.6)$$

čia λ_0 – šiluminio laidžio koeficientas, esant 0 °C temperatūrai; b – konstanta, nustatoma bandymais; t – temperatūra, °C.

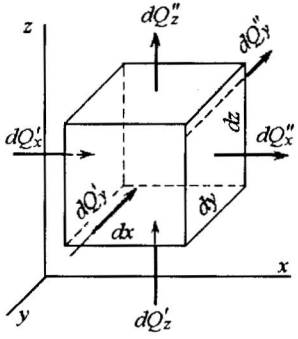
Medžiagų šiluminio laidžio koeficientai priklauso ne tik nuo temperatūros, bet ir nuo slėgio. Dujų λ didėja, didėjant temperatūrai, ir mažai priklauso nuo slėgio. Skysčių λ mažėja, didėjant jų temperatūrai. Kietų kūnų λ dažniau-

siai didėja, didėjant temperatūrai, o statybinių ir izoliacinių medžiagų – mažėja. Pluoštinių medžiagų λ priklauso ir nuo matavimo krypties.

12.2.3. Diferencialinė šilumos laidumo lygtis

Kai vyksta sudėtingi procesai, pvz., tokie kaip šilumos pernaša, sunku nustatyti greitai besikeičiančių būdingųjų dydžių priklausomybes. Tais atvejais, pasinaudojant matematinės fizikos metodais, nustatomas momentinis kintamųjų ryšys medžiagos tūrio elemente. Sudaroma bendro pavidalo diferencialinė lygtis, kurią išsprendus gaunama analitinė būdingųjų dydžių priklausomybė visam integravimo ir laiko intervalui.

Diferencialinė šilumos laidumo lygtis išvedama keletu būdų. Naudosime elementaraus gretasienio būdą. Išvesdami diferencialinę šilumos laidumo lygtį, apsiribosime šiomis sąlygomis: 1) kūne vyksta nenuostovusis šilumos laidumo procesas; temperatūros laukas trimatis; 2) medžiagos terminiai ir fizikiniai parametrai λ, c_p ir ρ yra pastovūs; 3) medžiagoje nėra vidinių šilumos šaltinių; 4) medžiaga yra vienalytė ir izotropinė; 5) masės elemento įgyta šiluma visa pereina į jo entalpiją. Iš kūno masės išskiriame elementą, kurio kraštinės dx, dy, dz (12.2 pav.), ir sudarome šilumos balanso lygtį.



12.2 pav. Šilumos pernašos kietojo kūno masės elemente schema

Remiantis energijos tvermės dėsniu galima teigti, kad per laiką $d\tau$ masės elemento laidumu įgyta šiluma yra lygi masės elemento entalpijos pokyčiui:

$$dQ = dh. \tag{12.7}$$

Šilumą dQ galima išreikšti šia suma:

$$dQ = dQ_x + dQ_y + dQ_z; \tag{12.8}$$

čia dQ_x, dQ_y, dQ_z – per laiką $d\tau$ masės elemento laidumu gauti šilumos kiekiai iš x, y ir z ašių kryptimis tekančios šilumos srautų, J.

Šiuos šilumos kiekius galima apskaičiuoti pagal į masės elementą įtekančios ir iš jo ištekančios šilumos kiekių skirtumą.

Masės elementas iš x ašies kryptimi tekančio šilumos srauto gauna šilumos, J:

$$dQ_x = dQ'_x - dQ''_x; \tag{12.9}$$

čia dQ'_x – per laiką $d\tau$ į masės elementą patenkantis šilumos kiekis x ašies kryptimi, J; dQ''_x – per laiką $d\tau$ iš masės elemento pasišalinantis šilumos kiekis x ašies kryptimi, J.

Šiuos šilumos kiekius apskaičiuojame remdamiesi Furjė dėsniu pagal (12.5) lygtį:

$$dQ'_x = -\lambda \cdot dy \cdot dz \cdot d\tau \cdot \frac{\partial t}{\partial x}; \tag{12.10}$$

$$dQ''_x = -\lambda \cdot dy \cdot dz \cdot d\tau \cdot \frac{\partial\left(t + \frac{\partial t}{\partial x} \cdot dx\right)}{\partial x}; \tag{12.11}$$

čia $\frac{\partial t}{\partial x} \cdot dx$ – temperatūros pokytis atstumu dx.

Pertvarkę (12.11) lygtį, gauname:

$$dQ''_x = -\lambda \cdot dy \cdot dz \cdot d\tau \cdot \frac{\partial t}{\partial x} - \lambda \cdot dx \cdot dy \cdot dz \cdot d\tau \cdot \frac{\partial^2 t}{\partial x^2}. \tag{12.12}$$

Įrašę į (12.9) lygybę dQ'_x ir dQ''_x vertes iš (12.10) ir (12.12) ir ją pertvarkę, gauname:

$$dQ_x = \lambda \cdot dx \cdot dy \cdot dz \cdot d\tau \cdot \frac{\partial^2 t}{\partial x^2}. \tag{12.13}$$

Tačiau $dx \cdot dy \cdot dz = dV$ yra masės elemento tūris, m^3. Tuomet

$$dQ_x = \lambda \cdot dV \cdot d\tau \cdot \frac{\partial^2 t}{\partial x^2}. \tag{12.14}$$

Analogiškai apskaičiavę masės elemento įgytus šilumos kiekius y ir z ašių kryptimis, gauname:

$$dQ_y = \lambda \cdot dV \cdot d\tau \cdot \frac{\partial^2 t}{\partial y^2}; \tag{12.15}$$

$$dQ_z = \lambda \cdot dV \cdot d\tau \cdot \frac{\partial^2 t}{\partial z^2}. \tag{12.16}$$

Iš (12.14), (12.15) ir (12.16) lygčių gautas dQ_x, dQ_y iš dQ_z, vertes įrašome į (12.7) lygtį ir apskaičiuojame, kiek iš viso šilumos, J, gaus masės elementas per laiką $d\tau$:

$$dQ = \lambda \cdot dV \cdot d\tau \cdot \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right). \qquad (12.17)$$

Masės elemento entalpijos pokytį, J, per laiką $d\tau$ galima išreikšti taip:

$$dh = c_p \cdot \rho \cdot dV \cdot \frac{\partial t}{\partial \tau} \cdot d\tau. \qquad (12.18)$$

Į (12.12) lygtį įrašę dQ ir dh vertes iš (12.17) ir (12.18) lygčių, gauname:

$$\lambda \cdot dV \cdot d\tau \cdot \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right) = c_p \cdot \rho \cdot dV \cdot \frac{\partial t}{\partial \tau} \cdot \partial \tau$$

arba

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\lambda}{c_p \cdot \rho} \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right). \qquad (12.19)$$

Narys $\lambda/(c_p \cdot \rho)$ vadinamas *temperatūrinio laidžio koeficientu* ir žymimas raide *a*. Jo matavimo vienetas $[a] = \left[\frac{\lambda}{\rho \cdot c_p} \right] = \left[\frac{W \cdot m^3 \cdot kg \cdot K}{m \cdot K \cdot kg \cdot J} \right] = \left[\frac{m^2}{s} \right]$.

Reiškinys (12.19) lygties skliausteliuose $\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2}$ vadinamas temperatūros Laplaso operatoriumi ir žymimas $\nabla^2 t$. Jis yra trimačio lauko temperatūros gradientas.

Sutrumpintai pažymėję (12.19) lygties narius, suteikiame jai tokį pavidalą:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \cdot \nabla^2 t. \qquad (12.20)$$

Ši diferencialinė šilumos laidumo lygtis dar yra vadinama Furjė lygtimi. Ji sieja kiekvieno kūno taško temperatūros pokyčius pagal laiką ir jo vietą ir gali būti naudojama taškų temperatūrai apskaičiuoti.

Kai temperatūros laukas yra vienmatis nenuostovusis ir kūne temperatūra kinta tik *x* ašies kryptimi, diferencialinė šilumos laidumo lygtis yra tokia:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \cdot \frac{\partial^2 t}{\partial x^2}, \qquad (12.21)$$

nes $\frac{\partial t}{\partial y} = \frac{\partial t}{\partial z} = 0.$

Diferencialinė šilumos laidumo lygtis, atitinkanti nuostovųjį šilumos laidumo režimą, esant trimačiam temperatūros laukui, užrašoma taip:

$$\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} = 0, \qquad (12.22)$$

nes $\frac{\partial t}{\partial \tau} = 0.$

Šilumos sklidimo laidumu procesas gali būti aprašytas matematiškai, diferencialine lygtimi. Ši lygtis įrodoma remiantis energijos tvermės ir substancijos pernašos dėsningumais, laikant, kad kūno šiluminės fizikinės savybės – tankis ρ, savitoji šiluma c_p ir šiluminio laidžio koeficientas λ yra pastovūs dydžiai.

Pirmosios knygos 3.2.2 skyrelyje pateikta diferencialinė šilumos pernašos (Furjė ir Kirchhofo) lygtis

$$\frac{dt}{d\tau} = \frac{\partial t}{\partial \tau} + w_x \cdot \frac{\partial t}{\partial x} + w_y \frac{\partial t}{\partial y} + w_z \cdot \frac{\partial t}{\partial t} = \frac{\lambda}{\rho \cdot c_p} \cdot \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right) \qquad (12.23)$$

rodo, kad taško $M(x, y, z, \tau)$ temperatūra laikui bėgant $(\partial t/\partial \tau)$ kinta todėl, kad per jį sklinda konvekcinis šilumos srautas $\rho \cdot c_p \cdot w_n \cdot \partial t/\partial n$ ir šilumos laidumo srautas $\lambda \cdot \partial^2 t/\partial n^2$.

Kadangi nagrinėjame gryną šilumos laidumo procesą, o jame $w_n(w_x, w_y, w_z) = 0$, tai (12.23) lygtis užrašoma taip:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\lambda}{\rho \cdot c_p} \cdot \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right). \qquad (12.24)$$

Taigi, galutinai Furjė šilumos laidumo lygtis užrašoma taip:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \cdot \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right), \qquad (12.24a)$$

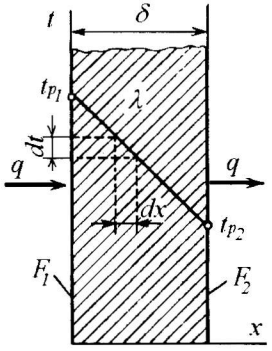
arba $\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \cdot \nabla^2 t$. (12.24b)

Naudodamiesi šia lygtimi sprendžiame kūnuose vykstančių nuostoviųjų ir nenuostoviųjų šilumos laidumo procesų uždavinius.

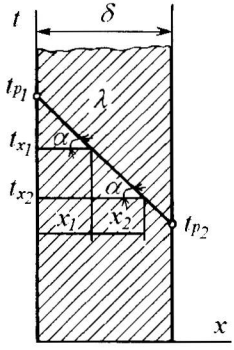
Šilumokaičių šilumos pernašos paviršiai dažniausiai turi plokščias arba cilindrines, rečiau sferines sieneles. Todėl šilumos sklidimo uždavinių sprendimas, esant nurodytoms geometrinėms formoms, turi didelę praktinę vertę.

12.2.4. Plokščios sienelės šilumos laidumas

Chemijos pramonėje apdorojant medžiagas reikia žinoti per technologinius aparatus arba jų atskiras konstrukcijas laidumu sklindančios šilumos srautus bei aparatų paviršiaus temperatūrą. Juos galima apskaičiuoti remiantis Furjė dėsniu. Čia panagrinėsime pačius bendriausius ir dažniausiai pasitaikančius laidumo atvejus: plokščių ir cilindrinių sienelių šilumos laidumą.



12.3 pav. Šilumos pernašos per vienalytę plokščią sienelę schema



12.4 pav. Temperatūros kitimas plokščioje sienelėje

Tarkime, kad turime vienalytės medžiagos plokštę, kurios storis δ (12.3 pav.), o šiluminio laidžio koeficientas λ. Sakykime, kad sienelės temperatūra kinta tik x ašies kryptimi, be to, visame ribiniame paviršiuje F_1 ji yra vienoda ir lygi t_{p_1}, o visame paviršiuje F_2 lygi t_{p_2}. Plokštės $F_1 = F_2 = F$. Kai $t_{p_1} \neq t_{p_2}$, sienelėje laidumu tekės šiluma. Jos srautą galima apskaičiuoti pagal Furjė lygtį. Tam tikslui sienelėje išskiriame elementarų dx storio sluoksnį ir parašome (12.5) lygtį:

$$Q = -\lambda \cdot F \cdot grad(t) = -\lambda \cdot F \cdot \frac{dt}{dx},$$

$$\frac{Q}{\lambda \cdot F} \cdot dx = -dt.$$

Esant nuostoviajam srautui $Q = const$, todėl

$$\frac{Q}{\lambda \cdot F} \int_{x=0}^{x=\delta} dx = -\int_{t_{p_1}}^{t_{p_2}} dt.$$

Suintegravę gauname plokščioje sienelėje laidumu sklindantį šilumos srautą Q, W:

$$Q = \frac{t_{p_1} - t_{p_2}}{\delta/\lambda} \cdot F. \qquad (12.25)$$

Šio srauto tankis q, W/m^2:

$$q = \frac{Q}{F} = \frac{t_{p_1} - t_{p_2}}{\delta/\lambda}. \qquad (12.26)$$

Narys δ/λ (12.26) lygties vardiklyje vadinamas plokščios sienelės *šilumine* varža.

Temperatūros pasiskirstymą sienelėje galima nustatyti parašius (12.26) lygtį atskiriems x_1 ir x_2 storių sienelių sluoksniams (12.4 pav.):

$$q = \frac{\lambda \cdot \left(t_{p_1} - t_{x_1}\right)}{x_1} = \frac{\lambda \cdot \left(t_{x_1} - t_{x_2}\right)}{x_2} = const. \qquad (12.27)$$

Nusistovėjus šilumos sklidimo pobūdžiui, šilumos srautas ir jo tankis sienelėje bus pastovūs. Tada

$$\frac{\left(t_{p_1} - t_{x_1}\right)}{x_1} = \frac{\left(t_{x_1} - t_{x_2}\right)}{x_2} = tg\alpha = const. \qquad (12.28)$$

Taigi, temperatūra sienelėje kinta tiesiškai.

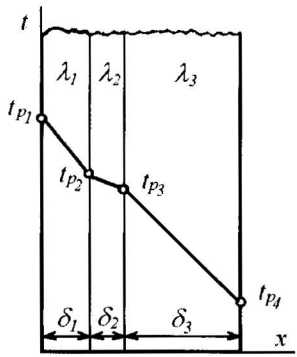
Sluoksniuotos plokščios sienelės šilumos laidumas. Tarkime, kad turime trijų sluoksnių sienelę (12.5 pav.). Sluoksnių storiai δ_1, δ_2, δ_3, o jų šiluminio laidžio koeficientai λ_1, λ_2 ir λ_3. Sluoksnių išorinių paviršių temperatūros t_{p_1}, t_{p_2}, t_{p_3} ir t_{p_4}. Pasinaudodami (12.26) lygtimi, galime parašyti per atskirus sluoksnius sklindančių šilumos srautų tankių q, W/m^2, išraiškas:

$$q_1 = \frac{t_{p1} - t_{p2}}{\delta_1 / \lambda_1}; \tag{12.29}$$

$$q_2 = \frac{t_{p2} - t_{p3}}{\delta_2 / \lambda_2}. \tag{12.30}$$

$$q_3 = \frac{t_{p3} - t_{p4}}{\delta_3 / \lambda_3}. \tag{12.31}$$

Jeigu šilumos sklidimas laidumu yra nuostovusis, tai $q_1 = q_2 = q_3$.



12.5 pav. Temperatūros kitimas plokščioje daugiasluoksnėje sienelėje

Išsprendę šią lygčių sistemą, gauname per plokščią trijų sluoksnių sienelę laidumu sklindančio šilumos srauto tankio q, W/m^2, išraišką:

$$q = \frac{t_{p1} - t_{p4}}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3}}. \tag{12.32}$$

Šilumos, sklindančios laidumu per trijų sluoksnių plokščią sienelę, srautas Q, W, bus

$$Q = \frac{t_{p1} - t_{p4}}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3}} F. \tag{12.33}$$

(12.33) lygties vardiklyje esantis narys rodo trijų sluoksnių sienelės suminę šiluminę varžą R.

Analogiškai parašomos šilumos, sklindančios laidumu per n sluoksnių sienelę, srauto tankio q, W/m^2, srauto Q, W, ir terminės varžos R, (m·K)/W, arba terminio sienelės pasipriešinimo, lygtys:

$$q = \frac{t_{p1} - t_{pn+1}}{\sum_{i=1}^{i=n} \delta_i / \lambda_i}; \tag{12.34}$$

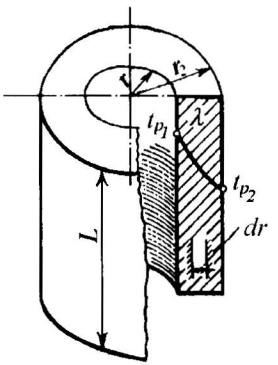
$$Q = \frac{t_{p1} - t_{pn+1}}{\sum_{i=1}^{i=n} \delta_i / \lambda_i} \cdot F; \tag{12.35}$$

$$R = \sum_{i=1}^{i=n} \delta_i / \lambda_i \,. \qquad (12.36)$$

Temperatūros kitimą sienelėje vaizduoja laužtinė linija (12.5 pav.). Atskirų sluoksnių ribojimosi taškų temperatūras galima apskaičiuoti pagal (12.29), (12.30) ir (12.31) lygtis.

12.2.5. Cilindrinės sienelės šilumos laidumas

Imkime L ilgio vamzdį, kurio sienelės paviršių temperatūros yra t_{p_1} ir t_{p_2} (12.6 pav.).



12.6 pav. Temperatūros kitimas vienalytėje cilindrinėje sienelėje

Jei $t_{p_1} > t_{p_2}$, tai susidaręs šilumos srautas sklis iš cilindro centro periferijos link. Šiuo atveju paviršius, per kurį laidumu teka šiluma, nėra pastovus: jis didėja einant iš centro radialiaja kryptimi. Sienelės šiluminio laidžio koeficientas λ yra pastovus. Kad galėtume lygtimi aprašyti šilumos srautą, išpjauname spindulio r atstumu nuo centro elementarų dr storio cilindrinį sluoksnelį. Galima tarti, kad šio sluoksnelio vidinio ir išorinio paviršių plotai yra vienodi ir lygūs $2 \cdot \pi \cdot r \cdot L$. Kadangi šiuo atveju temperatūros gradientas $grad\,(t) = \dfrac{dt}{dr}$, tai pagal Furjė dėsnį šilumos srautas Q, W, bus apskaičiuojamas iš lygčių

$$Q = -\lambda \cdot F \cdot grad(t) = -\lambda \cdot 2\pi \cdot r \cdot L \cdot \frac{dt}{dr}, \qquad (12.37)$$

arba

$$\int_{t_{p_1}}^{t_{p_2}} dt = -\frac{Q}{2 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot L} \cdot \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r}.$$

Išsprendę gauname lygtį laidumu per vienalytę cilindrinę sienelę sklindančios šilumos srautui Q, W, apskaičiuoti:

$$Q = \frac{t_{p1} - t_{p2}}{\frac{1}{2\pi} \cdot \frac{1}{\lambda} \cdot ln\frac{r_2}{r_1}} L \text{ arba } Q = \frac{t_{p1} - t_{p2}}{\delta/\lambda} \cdot F_{vid.log}; \qquad (12.38)$$

čia $F_{vid.log} = (F_2 - F_1)/ln(F_2/F_1)$ yra vadinamas vidutiniu logaritminiu cilindro paviršiumi.

Laidumu per cilindrinės sienelės paviršių sklindančios šilumos srauto linijinis tankis q_l, W/m, apskaičiuojamas taip:

$$q_l = \frac{Q}{L} = \frac{t_{p1} - t_{p2}}{\frac{1}{2\pi} \cdot \frac{1}{\lambda} \cdot ln\frac{r_2}{r_1}}. \qquad (12.39)$$

Vidutinis linijinis srauto tankis yra per 1 m ilgio cilindro sienelę pratekantis šiluminės energijos kiekis, W.

Kai $\delta/r_1 \leq 1$ arba $d_2/d_1 < 2$ (d_1 ir d_2 – vidinis ir išorinis cilindro skersmenys), tai vidutinis paviršius gali būti aritmetinis paviršių vidurkis. Jis apskaičiuojamas pagal lygtį

$$F_{vid} = \pi \cdot L \cdot (r_1 + r_2).$$

Narys (12.39) lygties vardiklyje yra cilindrinės sienelės šiluminė varža R, (m·K)/W, arba terminis sienelės pasipriešinimas:

$$R = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \lambda} \cdot ln\frac{r_2}{r_1}. \qquad (12.40)$$

(12.39) lygtis rodo, kad cilindrinėje sienelėje temperatūra yra pasiskirsčiusi pagal logaritminę kreivę.

Jei cilindrinė sienelė sudaryta iš n sluoksnių įvairių medžiagų, kurių šiluminio laidžio koeficientai $\lambda_1, \lambda_2, ..., \lambda_n$, sluoksnių paviršių kreivumo spinduliai $r_1, r_2, ..., r_n$, tai linijinio šilumos srauto tankis q_l, W/m, bus

$$q_l = \frac{t_{p1} - t_{p\,n+1}}{\frac{1}{2\pi} \cdot \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{\lambda_i} \cdot ln\frac{r_{i+1}}{r_i}}. \qquad (12.41)$$

Per n sluoksnių L ilgio cilindrinę sienelę laidumu sklindančios šilumos bendrasis srautas aprašomas tokia lygtimi:

$$Q = \frac{t_{p_1} - t_{p_{n+1}}}{\frac{1}{2\pi} \cdot \sum_{i=1}^{i=n} \frac{1}{\lambda_i} \cdot ln \frac{r_{i+1}}{r_i}} \cdot L. \qquad (12.42)$$

(12.42) lygties vardiklyje esantis narys yra n sluoksnių cilindrinės sienelės šiluminė varža.

Tokios sudėtinės cilindrinės sienelės kiekvieno sluoksnio viduje temperatūra kinta pagal logaritminę kreivę.

Jei palygintume cilindrinę ir plokščią sieneles, kai paviršių temperatūrų skirtumas vienodas ir kai $F_{vid} = \frac{\pi}{2} \cdot (d_1 + d_2) \cdot L$ ir $\delta = \frac{d_2 - d_1}{2}$, matytume, kad šilumos srautas per cilindrinę sienelę iš esmės skiriasi nuo srauto plokščioje sienelėje tik tada, kai jie yra stori.

Net kai $\frac{d_2}{d_1} \leq 2$, šilumos srauto cilindrinėje sienelėje skaičiavimo pagal plokščios sienelės skaičiavimo išraišką paklaida neviršys 4 %, todėl jau šiuo atveju cilindrinę sienelę galima skaičiuoti kaip plokščią sienelę.

12.3. Konvekcinė šilumos pernaša

12.3.1. Konvekcinės šilumos pernašos panašumo kriterijai ir lygtys

Šilumos pernašą kartu su judančia takiąja medžiaga, arba fluidu (takioji medžiaga – dujos, garai arba skystis), įprasta vadinti šilumine konvekcija. Jeigu medžiagos greitis w, o jo tankis ρ, tai per judėjimo krypčiai statmeno ploto vienetą ir laiko vienetą pernešama tokia medžiagos masė:

$$m = \rho \cdot w. \qquad (12.43)$$

Tokios masės pernešamos šilumos srauto tankis q_k, W/m^2,

$$q_k = m \cdot c_p \cdot t = w \cdot \rho \cdot c_p \cdot t; \qquad (12.43a)$$

čia c_p – fluido savitoji šiluma, J/(kg·K); t – fluido temperatūra, °C; m – masės srauto tankis, kg/(m^2·s).

Šiluminė konvekcija visada susijusi su šilumos laidumu, nes, judant fluidui, neišvengiamai liečiasi skirtingos temperatūros dalelės. Todėl bendrasis šilumos srauto tankis q, W/m^2, reiškiamas šilumos laidumo q_l ir konvekcijos q_k srautų tankių suma:

$$q = q_l + q_k. \qquad (12.44)$$

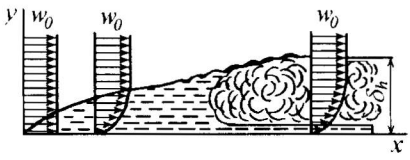
Įrašę srautų tankių vertes iš (12.5a) ir (12.43a) lygčių į (12.44) lygtį, gauname:

$$q = -\lambda \cdot grad(t) + w \cdot \rho \cdot c_p \cdot t. \qquad (12.45)$$

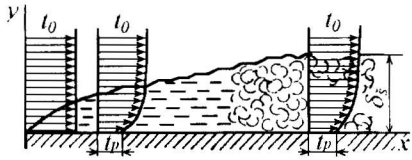
Šiluminę konvekciją tarp besiliečiančių fluidų arba tarp fluido ir kietojo kūno paviršiaus įprasta vadinti konvekciniu šilumos atidavimu arba tiesiog *šilumos atidavimu.*

Šilumos atidavimas – sudėtingas procesas, labai susijęs su tekančios medžiagos hidrodinamika. Jis priklauso nuo daugelio fizikinių ir geometrinių veiksnių. Ypač svarbi yra fluido hidrodinamika, nes nuo jos priklauso paviršiaus aptekėjimo – pasienio sluoksnių susiformavimo – mechanizmas.

Pasienio sluoksniai. Jeigu beribis fluido srautas, kurio greitis visuose skerspjūviuose yra vienodas (12.7 pav.), užteka ant paviršiaus, tai dalelės, kurios liečia paviršių, sustoja (jų greitis tampa lygus nuliui) ir dėl trinties pristabdo gretimas fluido daleles. Paviršius pasidengia pristabdyto fluido sluoksniu. Sluoksnis, kuriame greitis pasikeičia nuo nulio (prie paviršiaus) iki nesutrikdyto srauto greičio w_0, vadinamas *pasienio sluoksniu.*



12.7 pav. Hidrodinaminis pasienio sluoksnis



12.8 pav. Šiluminis pasienio sluoksnis

Analogiškai galima išskirti ir kitą paviršių dengiantį aptekamo fluido sluoksnį, kuriame fluido temperatūra pasikeičia nuo t_p – paviršiaus temperatūros iki t_0 – nesutrikdyto srauto temperatūros (12.8 pav.). Šis sluoksnis vadinamas *šiluminiu*, arba *terminiu*, pasienio sluoksniu. 12.7 ir 12.8 pav. matyti, kad sluoksnių storiai δ_h ir δ_s didėja, didėjant atstumui nuo aptekamo paviršiaus pradžios. Taip pat juose keičiasi ir tekėjimo pobūdis: sluoksnio formavimosi pradžioje jis yra laminarinis, o tolimesniame ruože – turbulentinis.

Atsižvelgdami į pasienio sluoksnių savybes, hidrodinaminiam pasienio sluoksniui galime parašyti: kai $y = 0$, tai $w = 0$, kai $0 < y < \delta_h$, tai $w = f(y)$, $\frac{\partial w}{\partial y} \neq 0$, o kai $y > \delta_h$, tai $w = w_0$, $\frac{\partial w}{\partial y} = 0$; atitinkamai šiluminiam pasienio

sluoksniui: kai $y = 0$, tai $t = t_p$, kai $0 < y < \delta_š$, tai $t = f(y)$, $\frac{\partial t}{\partial y} \neq 0$, o kai $y > \delta_š$, *tai* $t = t_0$, $\frac{\partial t}{\partial y} = 0$.

Taigi matome, kad šiluma paviršiui atiduodama per pasienio sluoksnį ir jos atidavimas priklauso nuo šilumos pernašos tarp pagrindinės srauto masės ir pasienio sluoksnio. Didžiausias temperatūros gradientas gaunamas pasienio sluoksnyje, jo terminis pasipriešinimas lemia šilumos atidavimo intensyvumą.

Niutono dėsnis. Pagrindinį šilumos atidavimo konvekcija dėsnį suformulavo Niutonas. Pagal jį per sekundę paviršiaus plotui fluido atiduotas šilumos kiekis (ar atvirkščiai – nuo paviršiaus fluido gautas) yra proporcingas šilumos pernašos paviršiaus plotui bei fluido ir paviršiaus temperatūrų skirtumui:

$$dQ = \alpha \cdot dF \cdot (t_f - t_p); \qquad (12.46)$$

čia α – proporcingumo koeficientas, vadinamas šilumos atidavimo koeficientu; Q – šilumos srautas, W; F – sąlyčio paviršiaus plotas, m^2; t_f – fluido temperatūra, °C; t_p – paviršiaus temperatūra, °C.

Šilumos atidavimo koeficiento matavimo vienetas

$$[\alpha] = [\frac{dQ}{(t_f - t_p)dF}] = [\frac{W}{m^2 \cdot K}] . \qquad (12.47)$$

Taigi koeficientas α yra šilumos srautas, kurį fluidas atiduoda 1 m^2 paviršiui, arba srautas nuo 1 m^2 paviršiaus, kai fluido ir aptekamojo paviršiaus temperatūros skiriasi vienu laipsniu.

Kad būtų galima naudotis Niutono lygtimi, reikia žinoti α vertę. Kadangi šilumos atidavimas yra sudėtingas hidrodinaminių ir šiluminių procesų sąryšis, tai koeficientas α priklauso nuo daugelio kintamųjų: fluido tekėjimo pobūdžio, greičio w, šilumos mainų aparato paviršiaus geometrijos ir matmenų, fluido šiluminių fizikinių parametrų, jo dinaminės klampos μ, savitosios šilumos c_p, tankio ρ, šiluminio laidžio koeficiento λ, šilumos srauto sklidimo krypties ir kt. Bendros lygties, kuri nusakytų šilumos atidavimo koeficiento α priklausomybę nuo visų šių kintamųjų, nėra, tačiau galima naudotis šia funkcija:

$$\alpha = f(w, \mu, c_p, \rho, \lambda, t_p, t, ...). \qquad (12.48)$$

Konvekcinė šilumos pernaša – tai šilumos pernešimas konvekcija ir šilumos laidumu tuo pačiu metu tarp skysčio (dujų, garų) ir kietojo kūno paviršiaus. Toks šilumos sklidimo atvejis dar vadinamas konvekciniu šilumos atidavimu arba tiesiog šilumos atidavimu. Šiame procese šiluma nuo kietojo

paviršiaus per pasienio sluoksnį plinta laidumu, o nuo pasienio sluoksnio į fluido srauto branduolį daugiausia pereina konvekcija.

Fluido tekėjimo pobūdį dažnai lemia jo judėjimą sukeliančios priežastys. Jei jo masės dalys įgauna skirtingas temperatūras, susidaro skirtingas fluido srauto dalių tankis, atsiranda natūralios gravitacijos judėjimas, kuris vadinamas *natūraliąja*, arba *laisvąja*, konvekcija. Jei fluido masės judėjimas kyla dėl išorinio sužadinimo – siurblio, ventiliatoriaus, jis vadinamas priverstiniu, o tuo metu vykstanti šilumos pernaša – *priverstine*.

Ir natūralioji, ir priverstinė konvekcija gali skirtis judėjimo intensyvumu. Pagal tai tekėjimas gali būti laminarinis (nesimaišantys, lygiagretūs fluido sluoksniai) ir turbulentinis, esant skersiniam srauto atžvilgiu masės perneši-mui. Turbulentinio režimo šilumos pernaša intensyvesnė nei laminarinio.

Šilumos atidavimo koeficiento priklausomybę nuo jį lemiančių veiksnių galima nustatyti teoriškai arba eksperimentiškai. Pirmuoju atveju ją gautume matematiškai aprašę šilumos atidavimo procesą diferencialinių lygčių sistema ir ją išsprendę, o antruoju – atlikę bandymus.

Šilumos atidavimo proceso diferencialinių lygčių sistema. Šilumos atidavimo procesą matematiškai aprašančią diferencialinių lygčių sistemą sudaro šilumos pernašos, energijos, judėjimo ir tolydumo diferencialinės lygtys.

Šilumos pernašos diferencialinė lygtis. Jei kūno paviršių apteka fluidas, tai iš jo srauto per laminarinį pasienio sluoksnį laidumu paviršiui atiduodamos šilumos srauto tankį, remiantis Furjė dėsniu, galima apskaičiuoti taip:

$$q = -\lambda \cdot grad(t); \tag{12.49}$$

čia q – šilumos srauto tankis, W/m^2; λ – fluido šiluminio laidžio koeficientas, W/(m·K); *grad(t)* – medžiagos temperatūros gradientas prie paviršiaus, K/m.

Tačiau tekantis fluidas šiam sluoksniui konvekcijos būdu tiekia šilumą, kurios srauto tankį q, W/m^2, pagal Niutono ir Richmano dėsnį galima išreikšti lygtimi

$$q = \alpha \cdot \Delta t.$$

Remdamiesi energijos tvermės dėsniu, galime parašyti, kad

$$-\lambda \cdot grad(t) = \alpha \cdot \Delta t \tag{12.50}$$

arba

$$\lambda \cdot grad(t) + \alpha \cdot \Delta t = 0. \tag{12.51}$$

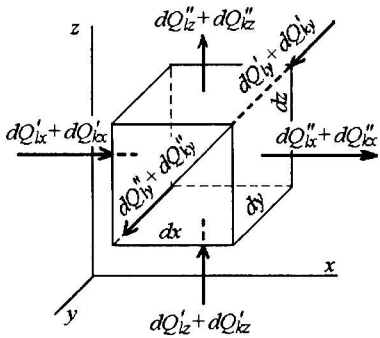
Gautoji (12.51) lygtis yra šilumos pernašos diferencialinė lygtis.

Energijos diferencialinė lygtis. Tekančioje medžiagoje išskiriame masės elementą, kurio tūris dV (12.9 pav.). Per trukmę $d\tau$ šio masės elemento laidu-

mo ir konvekcijos būdais gautos ir atiduotos šilumos skirtumas bus lygus jo entalpijos pokyčiui:

$$dQ_l + dQ_k = dh; \tag{12.52}$$

čia dQ_l – laidumu elemento įgyta šiluma, J; dQ_k – konvekcija elemento įgyta šiluma, J; dh – elemento entalpijos pokytis, J, per trukmę $d\tau$.



12.9 pav. Tekančios medžiagos masės elementas ir jo šilumos srautų schema

Kaip žinome, iš (12.18) lygties

$$dh = c_p \cdot \rho \cdot dV \cdot \frac{\partial t}{\partial \tau} \cdot d\tau. \tag{12.53}$$

Kaip ir kietojo kūno atveju, dQ_l randame iš (12.17) lygties:

$$dQ_l = \lambda \cdot dV \cdot \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right) \cdot d\tau. \tag{12.54}$$

Konvekcijos būdu masės elemento įgytą šilumą, J, galime išreikšti taip:

$$dQ_k = dQ_{kx} + dQ_{ky} + dQ_{kz}; \tag{12.55}$$

čia dQ_{kx}, dQ_{ky}, dQ_{kz} – x, y, z ašių kryptimis masės elemento konvekcijos būdu per trukmę $d\tau$ įgytos šilumos kiekiai, J.

Kiekvienos koordinačių ašies kryptimi masės elemento šilumą, įgytą konvekcijos būdu, randame iš ta kryptimi per trukmę $d\tau$ elemento gautos ir atiduotos šilumos skirtumo:

$$dQ_{kx} = dQ'_{kx} - dQ''_{kx}; \tag{12.56}$$

čia dQ'_{kx}, dQ''_{kx} – konvekcijos būdu elemento gauta ir per trukmę $d\tau$ x ašies kryptimi atiduota šiluma.

Tačiau

$$dQ'_{kx} = w_x \cdot \rho \cdot c_p \cdot t \cdot dy \cdot dz \cdot d\tau; \qquad (12.57)$$

čia w_x – fluido masės elemento greičio dedamoji x ašies kryptimi, m/s; c_p – fluido izobarinė savitoji šiluma, J/(kg·K); ρ – fluido tankis, kg/m^3; t – temperatūra, °C.

Per tą pačią trukmę medžiagos masės elementas konvekcijos būdu x ašies kryptimi atiduoda tiek šilumos, J:

$$dQ''_{kx} = w_x \cdot \rho \cdot c_p \cdot \left(t + \frac{\partial t}{\partial x} dx\right) \cdot dy \cdot dz \cdot d\tau. \qquad (12.58)$$

Įrašę dQ'_{kx}, dQ''_{kx} vertes į (12.56) lygtį, gauname fluido masės elemento konvekcija per trukmę $d\tau$ x ašies kryptimi gautą šilumos kiekį, J:

$$dQ_{kx} = w_x \cdot \rho \cdot c_p \cdot t \cdot dy \cdot dz \cdot d\tau - w_x \cdot \rho \cdot c_p \cdot \left(t + \frac{\partial t}{\partial x} dx\right) \cdot dy \cdot dz \cdot d\tau.$$

Iš čia

$$dQ_{kx} = -w_x \cdot \rho \cdot c_p \cdot \frac{\partial t}{\partial x} \cdot dV \cdot d\tau, \qquad (12.59)$$

nes $dy \cdot dx \cdot dz = dV$.

Analogiškai apskaičiuojame konvekcija y ir z ašių kryptimis per trukmę $d\tau$ elemento gautus šilumos kiekius, J:

$$dQ_{ky} = -w_y \cdot \rho \cdot c_p \cdot \frac{\partial t}{\partial y} \cdot dV \cdot d\tau; \qquad (12.60)$$

$$dQ_{kz} = -w_z \cdot \rho \cdot c_p \cdot \frac{\partial t}{\partial z} \cdot dV \cdot d\tau. \qquad (12.61)$$

Įrašę dQ_{kx}, dQ_{ky} ir dQ_{kz} vertes į (12.52) lygybę, gauname visą elemento konvekcijos būdu per trukmę $d\tau$ gautą šilumą, J:

$$dQ_k = -w_x \cdot \rho \cdot c_p \cdot \frac{\partial t}{\partial x} \cdot dV \cdot d\tau - w_y \cdot \rho \cdot c_p \cdot \frac{\partial t}{\partial y} \cdot dV \cdot d\tau - w_z \cdot \rho \cdot c_p \cdot \frac{\partial t}{\partial z} \cdot dV \cdot d\tau;$$

$$dQ_k = -\rho \cdot c_p \left(w_x \cdot \frac{\partial t}{\partial x} + w_y \cdot \frac{\partial t}{\partial y} + w_z \frac{\partial t}{\partial z}\right) \cdot dV \cdot d\tau. \qquad (12.62)$$

Įrašę į (12.52) lygybę iš (12.18), (12.17) ir (12.62) lygčių dh, dQ_l ir dQ_k vertes ir ją sutvarkę, gauname tekančios medžiagos diferencialinę energijos lygtį:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} + w_x \cdot \frac{\partial t}{\partial x} + w_y \cdot \frac{\partial t}{\partial y} + w_z \cdot \frac{\partial t}{\partial z} = a \cdot \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right). \quad (12.63)$$

Ši lygtis dar vadinama Furjė ir Kirchhofo diferencialine konvekcinės šilumos pernašos lygtimi. Ji kitu būdu buvo įrodyta 1-osios knygos 3.2.2 skyrelyje. Ši lygtis matematiškai aprašo šilumos sklidimo konvekcija ir laidumu procesą. Konvekciniam šilumos atidavimui išsamiai aprašyti šią lygtį papildome pernašos ant kieto kūno paviršiaus sąlygomis (ribinėmis sąlygomis).

Fluido judėjimo diferencialinė lygtis pateikta ir išnagrinėta trečioje pirmosios knygos dalyje (3.2.4).

Tolydumo diferencialinė lygtis. Šilumos atidavimo proceso diferencialinių lygčių sistemai apibrėžti naudojama dar viena – *medžiagos debito pastovumo* – lygtis. Ji taip pat jau buvo pateikta trečioje pirmosios knygos dalyje (3.2.1).

Taigi bendruoju atveju konvekcinį šilumos pernašos procesą matematiškai galima aprašyti šia diferencialinių lygčių sistema:

$$\begin{cases} \lambda \cdot grad(t) + \alpha \cdot \Delta t = 0, \\ \dfrac{Dt}{d\tau} - \alpha \cdot \nabla^2 t = 0, \\ \rho \cdot \dfrac{D\vec{w}}{d\tau} - \rho \cdot \vec{g} + \nabla p - \mu \cdot \nabla^2 \cdot \vec{w} = 0, \\ \dfrac{\partial w_x}{\partial x} + \dfrac{\partial w_y}{\partial y} + \dfrac{\partial w_z}{\partial z} = 0. \end{cases} \quad (12.64)$$

Kad būtų trumpiau, čia fluido judėjimo diferencialinė lygtis parašyta vektorine forma, energijos diferencialinės lygties kairioji pusė, atitinkanti funkcijos $t = f(x, y, z, \tau)$ pilnutinę išvestinę laiko atžvilgiu, pažymėta specialiu simboliu $Dt/d\tau$, o dešiniosios pusės trimačio temperatūros lauko temperatūros gradientas – simboliu $\nabla^2 t$.

Konvekcinio šilumos atidavimo panašumo lygtis. Kaip jau minėjome, sudėtingą konvekcinio šilumos atidavimo procesą aprašo (12.64) lygčių sistema.

Daugeliu praktinių atvejų ji yra neišsprendžiama. Dėl tos priežasties jos negalima panaudoti šilumos atidavimo koeficiento vertėms tiesiogiai nustatyti.

Praktikoje naudojame panašumo kriterijų lygtis, kurias iš minėtų lygčių gauname panašumo teorijos metodais, panašiai kaip buvo gautos hidrodinaminių procesų kriterijų lygtys (1-oji knyga).

Iš pirmosios (12.64) lygties, dalydami jos narius iš kairiojo nario, gauname dimensijos neturintį kompleksą:

$$\frac{\alpha(t_f - t_p)\cdot\partial n}{\lambda\cdot\partial t} = \frac{\alpha\cdot\Delta t\cdot\partial n}{\lambda\cdot\partial t}.$$

Gautame komplekse panaikinę diferencijavimo, skirtumo ir krypties ženklus (n pakeičiame į procesui būdingą linijinį dydį l) ir pertvarkę gauname Nuselto kriterijų:

$$Nu = \frac{\alpha\cdot l}{\lambda}. \qquad (12.65)$$

Gautas Nuselto kriterijus yra dimensijos neturintis dydis, nusakantis šilumos pernašos intensyvumą srauto ir sienelės riboje. Kiekvienu šilumos atidavimo atveju matmuo l yra lemiamas ir būdingas konkrečiam procesui.

Iš konvekcinės šilumos pernašos lygties gauname:

$$\frac{\partial t}{\partial\tau} + w_x\cdot\frac{\partial t}{\partial x} + w_y\cdot\frac{\partial t}{\partial y} + w_z\cdot\frac{\partial t}{\partial z} = a\cdot\left(w_x\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + w_y\cdot\frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + w_z\cdot\frac{\partial^2 t}{\partial z^2}\right).$$

Dalydami visus šios lygties narius iš $a\left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2}\right)$, gauname dimensijos neturinčius kompleksus:

$$\frac{\partial t}{\partial\tau}\cdot\frac{\partial x^2}{a\cdot\partial^2 t} \text{ ir } \frac{w_x\cdot\partial t}{\partial x}\cdot\frac{\partial x^2}{a\cdot\partial^2 t}.$$

Gautuose kompleksuose panaikinę diferencijavimo (kartu ir diferencijavimo eilės) ir krypties simbolius ir suprastinę, gauname Furjė kriterijų:

$$\frac{1}{Fo = \dfrac{l^2}{a\cdot\tau}} \text{ arba } Fo = \frac{a\cdot\tau}{l^2}, \qquad (12.66)$$

taip pat Peklė kriterijų:

$$Pe = \frac{w\cdot l}{a}. \qquad (12.67)$$

Furjė kriterijus apibūdina ryšį tarp temperatūros lauko kitimo greičio (a) ir aptekamo kūno geometrinių parametrų (l) nenuostoviuosiuose procesuose (trukmės τ).

Peklė kriterijus nurodo fluide laidumu ir konvekcija pernešamų šilumos srautų santykį.

Pe kriterijus gali būti išreikštas dviejų panašumo kriterijų sandauga:

$$Pe = \frac{w \cdot l}{a} = \frac{w \cdot l}{\nu} \cdot \frac{\nu}{a} = Re \cdot Pr \qquad (12.68)$$

arba

$$Re = \frac{w \cdot l}{\nu} = \frac{w \cdot l \cdot \rho}{\mu} \text{ ir } Pr = \frac{\nu}{a}.$$

Reinoldso kriterijus $Re = \frac{w \cdot l}{\nu}$ išreiškia inercijos ir dinaminės klampos jėgų santykį fluido sraute.

Prandtlio kriterijus $Pr = \frac{\nu}{a}$ apibūdina tekančio fluido šiluminių fizikinių savybių lauką ir yra lygus hidrodinaminio ir šiluminio pasienio sluoksnių storių santykiui, kadangi greičio pokytis pasienio sluoksnyje yra proporcingas kinematinei klampai ν, o temperatūros pokytis – temperatūriniam laidžiui a. Jis apskaičiuojamas tik pagal takiosios medžiagos šiluminius fizikinius parametrus:

$$Pr = \frac{\nu}{a} = \frac{\mu \cdot c_p}{\lambda}; \left(a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c_p} \right). \qquad (12.69)$$

Tais atvejais, kai šiluma pernešama dėl natūralios konvekcijos ir tai yra sąlygojama fluido tankių skirtumo įvairiuose sistemos taškuose, procesas apibūdinamas Archimedo kriterijaus verte:

$$Ar = \frac{g \cdot l^3}{\nu^2} \cdot \frac{\rho_o - \rho}{\rho_o};$$

čia ρ_o, ρ – nepašilusio ir pašilusio fluido tankiai.

Kadangi tankių skirtumas įvairiuose sistemos taškuose atsiranda dėl pašilusio ir nepašilusio fluido temperatūrų skirtumo, tai kompleksas $\frac{\rho_o - \rho}{\rho_o}$ Archimedo kriterijuje pakeičiamas sandauga $\beta \cdot \Delta t$ ir gaunamas Grashofo kriterijus:

$$Gr = \frac{g \cdot l^3}{\nu^2} \cdot \beta \cdot \Delta t; \qquad (12.70)$$

čia $\beta = \frac{1}{v}\left(\frac{\partial v}{\partial t}\right)_p$ – fluido izobarinis tūrio plėtimosi koeficientas (dujų $\beta = \frac{1}{T}$);

$\Delta t = t_p - t_f$ – temperatūrų skirtumas, dėl kurio kyla natūrali konvekcija.

Grashofo kriterijus nusako fluido srauto hidrodinaminį pobūdį natūralios konvekcijos sąlygomis, kai vyksta dėl nepašilusio ir pašilusio fluido tankių skirtumo.

Iš gautų panašumo kriterijų suformuojama konvekcinio šilumos atidavimo proceso panašumo kriterijų lygtis:

$$f(Re, Gr, Nu, Pr, Fo) = 0. \qquad (12.71)$$

Šioje lygtyje tik Nuselto kriterijus sudarytas ne vien iš proceso vienareikšmiškumo sąlygų, todėl jis yra ieškomasis dydis, nustatomasis arba apibrėžiamasis panašumo kriterijus. Tada kriterijų lygtis parašoma taip:

$$Nu = f(Re, Gr, Pr, Fo). \qquad (12.72)$$

Nagrinėjant konkrečius šilumos atidavimo atvejus, ši lygtis suprastinama. Esant nuostoviajam šilumos atidavimo procesui iš panašumo kriterijų lygties pašalinamas *Fo* kriterijus:

$$Nu = f(Re, Gr, Pr). \qquad (12.73)$$

Esant priverstiniam fluido judėjimui, kai natūralios konvekcijos kaip nedidelės galima nepaisyti, iš panašumo kriterijų lygties pašalinamas Grashofo kriterijus:

$$Nu = f(Re, Pr) \text{ arba } Nu = A \cdot Re^m \cdot Pr^n. \qquad (12.74)$$

Natūralios konvekcijos sąlygomis iš kriterijų lygties pašalinamas Reinoldso kriterijus:

$$Nu = f(Gr, Pr) \text{ arba } Nu = A \cdot Gr^m \cdot Pr^n. \qquad (12.75)$$

Pagal konkrečiam uždaviniui tinkančią panašumo kriterijų lygtį apskaičiavus Nuselto kriterijaus vertę, randamas šilumos atidavimo koeficientas:

$$\alpha = Nu \cdot \frac{\lambda}{l}. \qquad (12.76)$$

Konkretūs (12.74) ir (12.75) lygčių koeficientai ir laipsnio rodikliai apskaičiuojami, apdorojus laboratorinių konvekcinių šilumos pernašos bandymų duomenis, gautus tiriant aparato originalo fizikinį modelį. Po to pagal (12.76) lygtį apskaičiuojamas konkretaus šilumos atidavimo proceso šilumos atidavimo koeficientas.

12.3.2. Šilumos atidavimas esant priverstiniam fluido tekėjimui kanalais

Tai vienas dažniausių šilumos atidavimo atvejų. Fluido tekėjimas kanale gali būti turbulentinio, laminarinio arba pereinamojo pobūdžio, kuris įvertinamas Reinoldso kriterijumi.

A. Turbulentinis fluido tekėjimas kanalu, kai $Re = \frac{w \cdot d}{\nu} > 10^4$.

Šiuo atveju naudojamos dvi pagrindinės lygtys: 1) *Dittuso ir Boelterio* lygtis, sudaryta apvaliam vamzdžiui, kai $Re > 10^4$, $l/d > 60$, $Pr = 0{,}7...100$:

$$Nu = 0{,}023 \cdot Re^{0{,}8} \cdot Pr^{0{,}4}; \qquad (12.77)$$

2) M. Michejevo lygtis, sudaryta bet kokio skerspjūvio kanalui, kai $Re = 10^4...5 \cdot 10^6$, $Pr = 0{,}6...2500$, $l/d > 50$:

$$Nu = 0{,}023 \cdot Re^{0{,}8} \cdot Pr^{0{,}43} \cdot \varepsilon_t \cdot \varepsilon_L \cdot \varepsilon_R; \qquad (12.78)$$

čia $Nu = \frac{\alpha \cdot d}{\lambda}$; $Re = \frac{w \cdot d}{\nu}$; $Pr = \frac{\nu}{a}$; Pr – Prandtlio kriterijus, randamas pagal fluido srauto vidutinę temperatūrą; α – ieškomasis šilumos atidavimo koeficientas, W/(m^2·K); d – (12.77) lygtyje kanalo skersmuo, (12.78) lygtyje – ekvivalentinis kanalo skersmuo $d_e = 4f/U$; f – kanalo skerspjūvio plotas, m^2; U – visas drėkinamojo kanalo perimetras, m; λ – šiluminio laidžio koeficientas, W/(m·K); $w = V/f$ – vidutinis fluido srauto greitis, m/s; V – fluido sekundinis tūrinis debitas, m^3/s; ρ – tankis, kg/m^3; μ – dinaminė klampa, Pa·s.

(12.78) lygtis galioja vamzdžiams, stačiakampiam, trikampiam, žiediniam kanalui ($d_2/d_1 = 1...5{,}6$), plyšiui ($a/b = 1...40$).

(12.78) lygtyje pataisos koeficientas ε_t įvertina šilumos srauto kryptį (srautas šildomas ar aušinamas):

$$\varepsilon_t = \left(Pr/Pr_w\right)^{0{,}25}; \qquad (12.78a)$$

čia Pr – Prandtlio kriterijus, esant vidutinei fluido temperatūrai; Pr_w – Prandtlio kriterijus, randamas pagal fluido temperatūrą, lygią vamzdžio sienelės temperatūrai (12.10 pav.).

Pataisos koeficientas ε_L įvertina pradinį stabilizacijos ruožą ir priklauso nuo kanalo ilgio ir skersmens santykio $\varepsilon_L = f(L/d)$; jis svarbus tik trumpiems kanalams, kai $\frac{L}{d} < 50$. Kai $\frac{L}{d} \geq 50$, $\varepsilon_L = 1{,}0$.

ε_L apskaičiuojamas pagal šią lygtį:

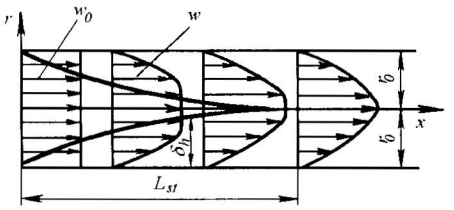
$$\varepsilon_L = \left(\frac{50}{\frac{L}{d_e}} \right)^n ; \text{ čia } n = \frac{1,87}{Re^{0,293}}. \qquad (12.78b)$$

Lygtis galioja, kai $10^4 \le Re \le 10^6$ ir $1 \le \frac{L}{d_e} \le 50$.

ε_R – pataisos koeficientas, įvertinantis kanalo kreivumą Pavyzdžiui, kai kanalas spiralinis, galima naudotis tokia išraiška:

$$\varepsilon_R = 1 + 1,77 \cdot \frac{d}{R}; \qquad (12.78c)$$

čia R – kanalo (gyvatuko) kreivumo spindulys, m; d – vamzdžio vidinis skersmuo, m.



12.10 pav. Greičio kitimas vamzdžio skerspjūviuose; L_{st} – hidrodinaminės stabilizacijos ruožas

Į (12.77) ir (12.78) lygtis įeinančių *Nu, Re* ir *Pr* kriterijų fluido šiluminiai fizikiniai parametrai apskaičiuojami pagal fluido vidutinę temperatūrą $t_m = 0,5 \cdot (t_{pr} + t_g)$.

Labiausiai paplitusioms medžiagoms (orui ir vandeniui), įvertinus šilumines fizikines savybes, (12.77) lygtis įgyja šią išraišką:

$$\alpha = 0,023 \cdot \frac{w^{0,8}}{d^{0,2}} \cdot \rho^{0,8} \cdot \left(\frac{c_p \cdot \lambda^{1,5}}{\mu} \right)^{0,4}.$$

Šios lygties apytikslė išraiška orui, kurio slėgis artimas atmosferos slėgiui, yra tokia:

$$\alpha = \frac{w_r^{0,8}}{d} \cdot \left[3,845 + 0,219 \cdot \left(\frac{t}{100} \right) - 0,006 \cdot \left(\frac{t}{100} \right)^2 \right]; \qquad (12.79)$$

čia t – temperatūra,°C; d – kanalo skersmuo, m; w_r – perskaičiuotas (0 °C ir 100 kPa) greitis, m/s; α – šilumos atidavimo koeficientas, W/(m^2·K).

(12.79) lygtis galioja, kai oro temperatūra kinta nuo 0 iki 1200 °C.

Analogiškai sotiesiems vandens garams gauname:

$$\alpha = \frac{w^{0,8}}{d} \cdot (1246 + 24,11 \cdot t - 0,055 \cdot t^2). \qquad (12.80)$$

(12.80) lygtis galioja temperatūros intervale $t = 0...200$ °C.

B. Pereinamasis fluido tekėjimas kanalu, kai $2,3 \cdot 10^3 < Re < 10^4$.

Šio pobūdžio fluido tekėjimas yra nestabilus, todėl šilumos atidavimą aprašančios lygtys yra tik apytikslės.

S. Kutateladzė pasiūlė šiuo atveju naudotis lygtimi

$$Nu = c \cdot Re^n \cdot Pr^{0,5}; \qquad (12.81)$$

čia apvaliems vamzdžiams $c = 0,00069$ ir $n = 1,24$, o stačiakampiams kanalams $c = 0,001$ ir $n = 1,18$.

M. Michejevas pasiūlė α skaičiuoti pagal šią lygtį:

$$Nu = \frac{\alpha \cdot d_e}{\lambda} = Nu_L \cdot \left(\frac{Re}{2100}\right)^{1,47 \cdot lg \frac{Nu_T}{Nu_L}} \cdot \varepsilon_L; \qquad (12.82)$$

čia Nu_L – Nu kriterijaus vertė, apskaičiuota pagal laminarinio režimo lygtį; Nu_T – Nu kriterijaus vertė, apskaičiuota pagal turbulentinio režimo lygtį; ε_L – pradinį stabilizacijos ruožą įvertinantis pataisos koeficientas (12.78b).

C. Laminarinis fluido tekėjimas kanalu, kai $Re < 2300$.

Šilumos atidavimo proceso intensyvumą šiuo atveju lemia tiek priverstinis, tiek natūralus fluido tekėjimas. Svarbu, ar kanalas vertikalus, ar horizontalus, sutampa ar ne laisvojo ir priverstinio tekėjimo kryptys ir pan. Visus šituos veiksnius tiksliai įvertinti nėra paprasta.

Praktiniams skaičiavimams M. Michejevas rekomenduoja naudotis tokia lygtimi:

$$Nu = \frac{\alpha \cdot d_e}{\lambda} = 0,15 \cdot \varepsilon_L \cdot Re^{0,33} \cdot Pr^{0,43} \cdot Gr^{0,1} \cdot \left(\frac{Pr}{Pr_w}\right)^{0,25}. \qquad (12.83)$$

Šioje lygtyje:

$$Re = \frac{w \cdot d_e}{\nu}; \; Gr = \frac{g \cdot l^3}{\nu^2} \cdot \beta \cdot \Delta t; \; Pr = \frac{c_p \cdot \mu}{\lambda};$$

čia β – fluido tūrinio plėtimosi koeficientas, $m^3/(m^3 \cdot K)$; Δt – fluido ir sienelės (arba atvirkščiai) temperatūrų skirtumas, °C; ε_L – pradinį stabilizacijos ruožą įvertinantis pataisos koeficientas (12.78b).

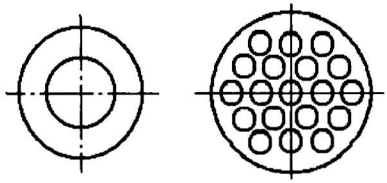
12.3.3. Šilumos atidavimas esant išoriniam lygių ir briaunotų vamzdžių aptekėjimui

Fluidui aptekant vamzdžių pluoštą iš išorės, šilumos atidavimo intensyvumas priklauso nuo fluido tekėjimo pobūdžio ir nuo pluošto geometrinių charakteristikų. Panagrinėkime keletą atvejų.

Šildytuve „vamzdis vamzdyje“ fluidas *turbulentiškai teka ertme tarp vamzdžių* (12.11 pav., *a*). Vidutiniam šilumos atidavimo koeficientui α apskaičiuoti naudotina tokia kriterinė lygtis:

$$Nu = 0{,}021 \cdot Re^{0{,}8} \cdot Pr^{0{,}4} \cdot \left(\frac{D}{d}\right)^{0{,}45}; \qquad (12.84)$$

čia D – išorinio vamzdžio vidinis skersmuo, m; d – vidinio vamzdžio išorinis skersmuo, m.



a *b*

12.11 pav. Išilginis tekėjimas tarp vamzdžių: *a* – šildytuve „vamzdis vamzdyje“; *b* – apvalkaliniame šildytuve

Būdinguoju matmeniu čia reikia imti vidinio vamzdžio išorinį skersmenį.

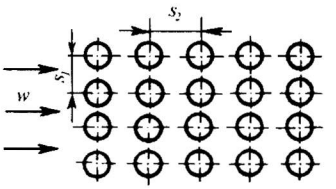
Fluidas išilgai apteka lygiagrečių vamzdžių pluoštą. Tarkime, turime apvalkalinį šildytuvą. Fluidas turbulentiškai teka išilgai tarpvamzdinės ertmės, kurią riboja bendras šildytuvo korpusas (12.11 pav., *b*). Cheminėje technologijoje tai būdingas šilumos atidavimo atvejis. Šilumos atidavimo koeficientą galima apskaičiuoti pagal šią kriterinę lygtį:

$$Nu = c \cdot (d_e \cdot Re)^{0{,}6} \cdot Pr^{0{,}33}; \qquad (12.85)$$

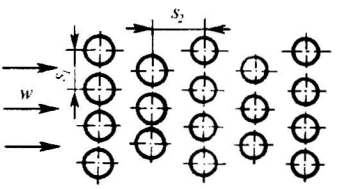
čia c – koeficientas. Kai nėra skersinių segmentinių vamzdžių pluošto pertvarų, $c = 1{,}16$, kai tokių pertvarų yra, $c = 1{,}72$.

Būdinguoju geometriniu matmeniu imamas ekvivalentinis skersmuo.

Vamzdžių pluošto išorinis skersinis aptekėjimas. Kadangi realių šilumokaičių vamzdžių aptekėjimas dažniausiai būna turbulentinio pobūdžio ($Re > 10^3$), nagrinėsime tik tokį atvejį. Vamzdžių išdėstymas pluošte parodytas 12.12 paveiksle.



12.12 pav. Koridorinis vamzdžių pluoštas



12.13 pav. Šachmatinis vamzdžių pluoštas

Šiuo atveju šilumos atidavimas priklauso nuo vamzdžių eilės srauto tekėjimo kryptimi: $\alpha_3 > \alpha_2 > \alpha_1$. Taip yra dėl to, kad vamzdžių pluoštu tekančio fluido turbulencija didėja. Pradedant nuo *3*-iosios eilės, turbulencija, kartu ir α, stabilizuojasi. Todėl turimos lygtys aprašo *3*-iosios ir tolimesnių eilių šilumos atidavimą. M. Michejevas šilumos atidavimo koeficientui α_3 apskaičiuoti siūlo tokias lygtis:

- Kai srautas apteka koridorinį lygių vamzdžių pluoštą (12.12 pav.):

$$Nu = 0{,}22 \cdot Re^{0{,}65} \cdot Pr^{1/3} \cdot \varepsilon_t \cdot \varepsilon_s \cdot \varepsilon_N \cdot \varepsilon_\varphi ; \qquad (12.86)$$

čia ε_s – pataisos koeficientas, įvertinantis konstrukcinį vamzdžių pluošto žingsnį,

$\varepsilon_s = (\frac{s_2}{d})^{-0{,}15}$; ε_N – koeficientas, įvertinantis eilių skaičių pluošte;

$\varepsilon_N = \frac{1}{F}\varepsilon_i \cdot F_i$; $\varepsilon_1 = 0{,}6$; $\varepsilon_2 = 0{,}9$; ε_3 ir tolesnėms vamzdžių eilėms $\varepsilon_i = 1$;

F_1 – *n*-osios vamzdžių pluošto eilės paviršius.

Koridoriniam pluoštui $\varepsilon_s = 1$. Lygtis galioja, kai $200 < Re < 2 \cdot 10^5$.

Pataisos koeficientas $\varepsilon_t = \left(\frac{Pr}{Pr_w}\right)^{0{,}25}$. Fluido šiluminiai fiziniai parametrai, įeinantys į Pr_w, parenkami pagal vidutinę vamzdžio sienelės temperatūrą:

$\varepsilon_\varphi = 1 - 0{,}54 \cdot \cos^2\varphi$;

čia φ – fluido srauto krypties į pluoštą kampas.

- Kai srautas apteka šachmatinį lygių vamzdžių pluoštą (12.13 pav.),

$$Nu = 0{,}40 \cdot Re^{0{,}6} \cdot Pr^{1/3} \cdot \varepsilon_t \cdot \varepsilon_s \cdot \varepsilon_N \cdot \varepsilon_\varphi . \qquad (12.87)$$

Lygtis galioja, kai $200 < Re < 2 \cdot 10^5$.

Pataisos koeficientas ε_s, įvertinantis pluošto geometriją,

$$\varepsilon_s = \left(\frac{s_1}{s_2}\right)^{1/6}, \text{ kai } \frac{s_1}{s_2} < 2, \text{ ir } \varepsilon_s = 1{,}12, \text{ kai } \frac{s_1}{s_2} \geq 2.$$

Pataisos koeficientas ε_N, įvertinantis eilių skaičių pluošte, šiuo atveju apskaičiuojamas pagal tokią lygtį:

$$\varepsilon_N = \frac{1}{F} \cdot \varepsilon_i \cdot F_i;$$

$\varepsilon_1 = 0{,}6$, $\varepsilon_2 = 0{,}7$, ε_3 ir $i > 3$ $\varepsilon_i = 1{,}0$.

Nepriklausomai nuo pluošto geometrijos kiti (12.86) ir (12.87) lygčių dydžiai yra tokie pat.

Į panašumo kriterijus įeinantis būdingasis vamzdžio matmuo yra jo skersmuo, todėl

$$Nu = \frac{\alpha \cdot d_i}{\lambda}; \; Re = \frac{w_s \cdot d_i}{\nu}; \; Pr = \frac{\nu}{a};$$

čia w_s – srauto greitis, apskaičiuojamas pagal pluošto siauriausio skerspjūvio plotą: $f_s = f_{fr} \cdot (1 - \frac{d_i}{s_1})$; f_{fr} – frontalinis pluošto skerspjūvio plotas.

Fluido šiluminių fizikinių parametrų vertės imamos pagal vidutinę srauto temperatūrą $t = 0{,}5 \cdot (t' + t'')$.

Vamzdžių pluošto išilginis aptekėjimas apvalkaliniame vamzdžių šilumokaityje. Šiuo atveju šilumos atidavimo koeficientą skaičiuojame pagal (12.77) ir (12.78) lygtis. Būdinguoju matmeniu šiose lygtyse tampa ekvivalentinis pluošto skersmuo d_e:

$$d_e = \frac{4 \cdot f}{U} = \frac{D_v^2 - n_v \cdot d_i^2}{D_v + n_v \cdot d_i}; \qquad (12.88)$$

čia d_e – ekvivalentinis pluošto skersmuo, kuris nepriklauso nuo ėjų skaičiaus z, nes d_e išraiškoje skaitiklį ir vardiklį reikėtų dalyti iš z.

Srauto greitis (Re) nustatomas pagal vienos ėjos pratekamąjį skerspjūvį (ėjos sujungtos nuosekliai):

$$F = 0{,}785 \cdot \frac{D_v^2 - n_v \cdot d_i^2}{z}; \qquad (12.89)$$

čia z – ėjų skaičius ($z = 1, 2, 4, 6, 8$); D_v – vidinis šilumokaičio apvalkalo skersmuo; d_i – išorinis vamzdelių skersmuo; n_v – bendras vamzdelių skaičius apvalkale.

Lygių vamzdžių pluošto skersinis aptekėjimas apvalkaliniame vamzdžių šilumokaityje. Tame pačiame apvalkaliniame vamzdžių šilumokaityje vamzdžiai pluošte gali būti išdėstyti koridoriniu ir šachmatiniu būdu, keičiant radialine kryptimi fluido srauto įtekėjimo atvamzdžio padėtį ir skersinę pertvarų padėtį.

Apvalkaliniai vamzdžių šilumokaičiai su pertvaromis būna sudėtingi, ir jiems apskaičiuoti nėra patikimų lygčių. Situaciją apsunkina tai, kad fluidas tarpvamzdinėje erdvėje dalį kelio gali judėti skersai vamzdžių pluošto, dalį išilgai. Be to, fluidas gali tekėti plyšiais tarp pertvarų ir vamzdžių. Šilumos atidavimo koeficientas α šiuo atveju apskaičiuojamas dvejopai:

1) pagal (12.86) ir (12.87) lygtis, laikant, kad koeficientas, įvertinantis srauto krypties kampą, $\varepsilon_\varphi = 0,6$;

2) pagal tokias apytiksles lygtis:

a) esant koridoriniam vamzdžių išdėstymui pluošte,

$$Nu = 0,154 \cdot Re^{0,6} \cdot Pr^{0,33}; \qquad (12.90)$$

b) esant šachmatiniam vamzdžių išdėstymui pluošte,

$$Nu = 0,195 \cdot Re^{0,6} \cdot Pr^{0,33}. \qquad (12.91)$$

Šiose lygtyse būdingasis matmuo yra vamzdelių išorinis skersmuo.

Būdingas srauto greitis w apskaičiuojamas pagal vidutinį minimalų skerspjūvio plotą F_{min}.

Segmentinių pertvarų

$$F_{\min} = \frac{\pi}{4} \cdot D_v \cdot l \cdot (l - \frac{d_i}{s}),$$

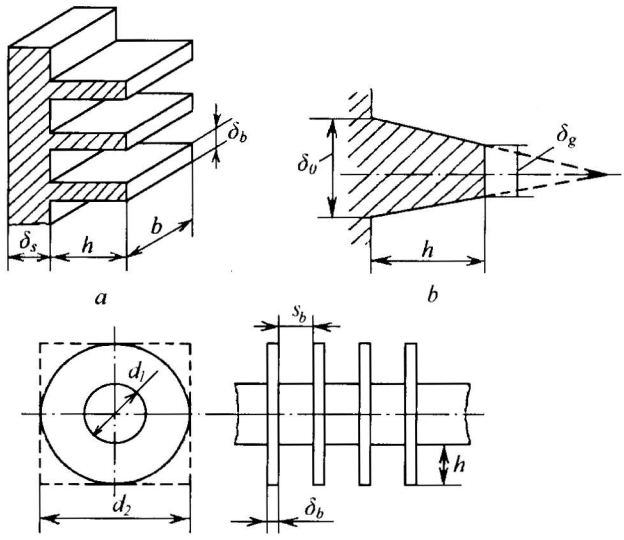
koncentrinių pertvarų

$$F_{\min} = \frac{\pi}{2} \cdot D_v \cdot l \cdot (l - \frac{d_i}{s});$$

čia D_v – apvalkalo vidinis skersmuo; l – atstumas tarp gretimų pertvarų. Standartinių šilumokaičių $l = 0,5 \cdot D_v$; s – vamzdžių žingsnis srauto skersinio tekėjimo kryptimi.

Šiose lygtyse fluidų šiluminių fizikinių parametrų vertės parenkamos pagal vidutinę fluido temperatūrą.

Skersinis briaunotų vamzdžių aptekėjimas. Kai $\alpha_1 >> \alpha_2$, vamzdžių paviršiai daromi briaunoti toje pusėje, kur α mažas. Taip būna, kai dujomis ar oru aušinama, kondensuojant ar garinant skysčius. Paviršių briaunų formos parodytos 12.14 paveiksle. Palyginti su lygiais vamzdžiais, jų aptekėjimo ir konvekcinio šilumos atidavimo sąlygos yra sudėtingesnės.



12.14 pav. Paviršių briaunų formos: *a* – išilginės; *b* – trapecinės; *c* – apvalios arba stačiakampės

Aptarkime pluoštus, sudarytus iš vamzdžių su apvaliomis briaunomis (12.14 pav., *c*). Šilumos atidavimo nuo briaunotos pusės koeficientas

$$Nu = C \cdot Re^m \cdot \left(\frac{s_b}{d_2}\right)^{0,54} \cdot \left(\frac{h}{s_b}\right)^{0,14} \cdot \Psi \cdot C_s \cdot C_z ; \qquad (12.92)$$

čia $Nu = \frac{\alpha \cdot s_b}{\lambda_f}$; $Re = \frac{w_s \cdot s_b}{\nu_f}$; α – vidutinė briaunotų vamzdžių paviršiaus šilumos atidavimo koeficiento vertė.

Dujų greitis nustatomas siaurajame skerspjūvyje f_s, kuris apskaičiuojamas pagal lygtį:

$$f_s = \left[1 - \frac{d_2}{s_1} \cdot \left(1 + 2 \cdot \frac{h}{s_b} \cdot \frac{\delta_b}{d_2}\right)\right] \cdot f ; \qquad (12.93)$$

čia δ_b – briaunos storis; f – šilumokaičio frontalinio skerspjūvio plotas; s_1 – skersinis vamzdžių žingsnis; h – briaunos aukštis; s_b – briaunos žingsnis.

Šilumos atidavimo proceso netolygumas briaunos aukštyje įvertinamas koeficientu

$$\Psi = 1 - 0{,}058 \cdot \sqrt{\frac{\alpha \cdot 2}{\lambda_f \cdot \delta_b}} \cdot h .$$

Briaunoti vamzdžiai šilumokaityje gali būti išdėstyti horizontaliomis eilėmis arba šachmatiškai. Esant horizontaliam briaunotų vamzdžių išdėstymui, (12.92) lygtyje imame: $C = 0{,}105$; $m = 0{,}72$.

Skersinių ėjų skaičius z pluošte įvertinamas koeficientu C_z:

$z =$	1	2	3	4	ir daugiau,
$C_z =$	1,6	1,3	1,1	1,0	1,0.

Vamzdžių tankis pluošte įvertinamas koeficientu C_s:

$\frac{s_2}{d_2} =$	1,4	1,7	2	ir daugiau,
$C_s =$	0,85	0,96	1,0	1,0;

čia s_2 – išilginis vamzdžių žingsnis.

(12.92) lygtis galioja, kai $Re = 500...25000$; $\frac{d_2}{s_2} = 3...8$; $\frac{h}{s_b} = 0{,}36...4{,}3$.

Esant šachmatiniam briaunotų vamzdžių išdėstymui, imame: $C = 0{,}23$; $m = 0{,}65$.

Koeficientas $C_s = \left(\frac{s_1 - d_2}{s_3 - d_2}\right)^{0{,}2}$;

čia s_3 – įstrižinis vamzdžių žingsnis pluošte, $s_3 = \sqrt{s_2^2 + (0{,}5 \cdot s_1)^2}$.

Koeficientas C_z imamas toks:

$z =$	1	4	6	8	10	16	20,
$C_z =$	0,8	0,95	0,98	0,99	1,0	1,015	1,025.

(12.92) lygtis galioja, kai $Re = 300...22500$; $(d_2/s_b) = 22{,}4...3{,}5$; $(h/s_b) = 0{,}36...5{,}0$; $C_s = 0{,}46...2{,}18$.

Koridorinio vamzdžių pluošto su briaunotomis plokštėmis aptekėjimas. Kai briaunos formuojamos ištisinių metalinių (aliumininių) plokščių pavidalu, jas kertantis pluoštas dažniausiai būna koridorinis.

Plokščių storis $\delta_b = 0{,}2...0{,}5$ mm, briaunų žingsnis $s_b = 2...3$ mm, $\frac{s_1}{d} \approx \frac{s_2}{d} = 2$.

Šilumos atidavimo koeficientą rekomenduojama apskaičiuoti pagal tokią lygtį:

$$Nu = C \cdot Re^n \cdot \left(\frac{L}{d_e}\right)^m ; \qquad (12.94)$$

čia L – bendras plokštės ilgis oro tekėjimo kryptimi, m.

Į *Re* ir *Nu* skaičius įeinantis linijinis matmuo:

$$d_e = \frac{2 \cdot (s_i - d_i) \cdot (s_b - \delta_b)}{(s_1 - d_i) + (s_b - \delta_b)} .$$

(12.94) lygties kriterijų laipsnių rodikliai:

$$n = 0{,}45 + 0{,}0066 \cdot \left(\frac{L}{d_e}\right), \; m = 0{,}28 + 0{,}08 \cdot \left(\frac{Re}{1000}\right).$$

Lygties koeficientas

$$C = A \cdot \left(0{,}36 - 0{,}24 \cdot \frac{Re}{1000}\right);$$

čia daugiklio A vertės imamos, kai

$\frac{L}{d_e} =$	5	10	20	30	40	50,
$A =$	0,412	0,326	0,201	0,125	0,080	0,0475.

Kai vamzdžiai pluošte išdėstyti šachmatiškai, pagal (12.91) lygtį apskaičiuotas α vertes reikia padidinti 10 %.

Skaičiuojant bendrą šilumos perdavimo koeficientą, reikia įvertinti terminę varžą dėl ne visada tobulo vamzdžio ir plokštės kontakto:

- kai paviršius lakuotas, $R_k = 0{,}0066$;
- kai paviršius emaliuotas, $R_k = 0{,}0107$;
- kai paviršius karštai cinkuotas, $R_k = 0$.

12.3.4. Šilumos atidavimas fluidui išilgai aptekant plokščią sienelę

Jei srautas teka išilgai plokščios sienelės ir šis procesas vyksta neapribotoje erdvėje, šilumos atidavimo koeficientas apskaičiuojamas pagal tokias lygtis:

- kai $Re > 10^4$, naudojama tokia apytikslė lygtis:

$$Nu = 0{,}037 \cdot Re^{0{,}8} \cdot Pr^{0{,}43} \cdot \left(\frac{Pr}{Pr_w}\right)^{0{,}25} ; \qquad (12.95)$$

čia $Nu = \frac{\alpha \cdot l}{\lambda}$; $Re = \frac{w \cdot l}{\nu}$; $Pr = \frac{\mu \cdot c_p}{\lambda}$; l – sienelės ilgis srauto tekėjimo kryptimi.

Į kriterijus įeinantys srauto šiluminiai fizikiniai parametrai nustatomi pagal srauto pradinę temperatūrą;

- kai $Re < 10^4$, naudojama tokia apytikslė lygtis:

$$Nu = 0{,}076 \cdot Re^{0{,}5} \cdot Pr^{0{,}43} \cdot \left(\frac{Pr}{Pr_w}\right)^{0{,}25}. \qquad (12.96)$$

Būdingieji dydžiai tie patys, kaip ir (12.95) lygtyje. Reikia pažymėti, kad (12.95) ir (12.96) lygtys neįvertina pradinio srauto turbulentškumo, o kai srauto greičiai maži, – laisvojo srauto judėjimo įtakos.

Kai gali kilti natūrali konvekcija, šilumos atidavimo koeficientas apskaičiuojamas ir laisvojo judėjimo atvejui, o iš dviejų šilumos atidavimo koeficiento verčių pasirenkama didesnė.

12.3.5. Šilumos atidavimas esant gravitaciniam skysčių tekėjimui

Šilumokaičių sienelės dažnai drėkinamos (laistomos) skysčiu. Veikiant gravitacinėms jėgoms tekantis plonas skysčio sluoksnis vadinamas plėvele. Šiame skyrelyje kalbama apie plėvelės šildymo ar aušinimo procesą ir nekalbama apie virimą.

Šilumos atidavimas šiuo atveju priklauso nuo plėvelės tekėjimo pobūdžio, laistymo intensyvumo, paviršiaus ir skysčio temperatūrų skirtumo, fluido šiluminių fizikinių savybių ir kt.

Dažniausiai technikoje gravitacinių jėgų veikiamas skystis teka vertikaliais arba horizontaliais paviršiais. Aptarsime pagrindinius tokio tekėjimo atvejus.

Gravitacinė plėvelė teka vertikaliais paviršiais.

Kadangi plėvelės storis ir tekėjimo greitis yra sunkiai išmatuojami dydžiai, šiuo atveju Re kriterijų labai patogu išreikšti linijiniu paviršiaus laistymo tankiu $\Gamma = \frac{m}{U}\ [\frac{kg}{m \cdot s}]$. Čia m – plėvelės masės debitas, U – drėkinamasis, arba šlapiasis, perimetras. Tokiu atveju $d_e = \frac{4f}{U} = \frac{4 \cdot n \cdot \pi \cdot d_v \cdot \delta}{n \cdot \pi \cdot d_v} = 4 \cdot \delta$;

$$\Gamma = \frac{m}{U} = \frac{w \cdot n \cdot \pi \cdot d_v \cdot \delta \cdot \rho}{n \cdot \pi \cdot d_v} = w \cdot \delta \cdot \rho \quad \text{ir} \quad Re_p = \frac{w \cdot d_e \cdot \rho}{\mu} = \frac{\Gamma \cdot 4 \cdot \delta \cdot \rho}{\delta \cdot \rho \cdot \mu} = \frac{4 \cdot \Gamma}{\mu}.$$

Praktikoje laikoma, kad, kai $Re_p < 1600$, plėvelės tekėjimas yra laminarinis, kai $Re_p > 1600$, – turbulentinis.

Kai tekėjimas yra laminarinis ($Re_p < 1600$) ir vyksta vertikaliu paviršiumi, šilumos atidavimo koeficientas apskaičiuojamas pagal lygtį

$$Nu_p = 0{,}67 \cdot Re_p \cdot \mathrm{Pr}^{1/3} \cdot \left(\frac{h}{\delta_r}\right)^{1/3}; \qquad (12.97)$$

čia δ_r – plėvelės redukuotasis storis, m. $\delta_r = (\frac{\nu^2}{g})^{1/3}$ – tai kompleksas, apibūdinantis plėvelės storį, išreiškiamą ilgio matavimo vienetais.

Plėvelės Nuselto kriterijus

$$Nu_p = \frac{\alpha \cdot \delta_r}{\lambda} = \frac{\alpha}{\lambda} \cdot \left(\frac{\nu^2}{g}\right)^{1/3}. \qquad (12.98)$$

Kai stabilizuotos plėvelės tekėjimas yra turbulentinis ($Re_p > 1600$), galima naudotis lygtimi

$$Nu_p = 0{,}01 \cdot \left(Re_p \cdot Pr\right)^{1/3} \qquad (12.99)$$

arba prof. G. Gimbučio su bendraautoriais pasiūlyta lygtimi

$$Nu_p = (0{,}165 \cdot Re_p^{0{,}16} - 0{,}4) \cdot Pr^{0{,}34}. \qquad (12.100)$$

Gravitacinė plėvelė teka horizontalių vamzdžių išorėje.

Tai būdinga skysčio plėvele drėkinamiems šilumokaičiams, sudarytiems iš horizontalių vienas greta kito išdėstytų vamzdžių pluošto. Tokiu atveju šilumos atidavimo koeficientą galima apskaičiuoti pagal šią lygtį:

$$Nu_p = 0{,}339 \cdot Re_p^{0{,}16} \cdot Ga^{0{,}12} \cdot Pr^{0{,}34}; \qquad (12.101)$$

čia $Nu_p = \frac{\alpha}{\lambda} \cdot (\frac{\nu^2}{g})^{1/3}$; $Re_p = \frac{4 \cdot m}{U \cdot \mu}$; $U = 2 \cdot L$; $\Gamma = \frac{m}{2 \cdot L}$; 2 – koeficientas, įvertinantis tai, kad skystis nuteka į abi vamzdžio puses; $Ga = \frac{g \cdot d^3}{\nu^2} = \left(\frac{d}{\delta_r}\right)^3$ – Galilėjaus kriterijus.

12.3.6. Šilumos atidavimas esant natūraliai fluido konvekcijai

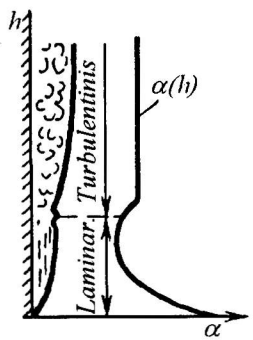
Natūralios konvekcijos atveju, esant fluido įšilusių dalelių tankio ρ ir šaltų dalelių tankio ρ_0 skirtumui, vertikaliai veikia gravitacinis slėgis, kuris išreiškiamas Archimedo dėsniu:

$$K = g \cdot (\rho - \rho_0) \cdot h = g \cdot \beta \cdot (T - T_0) \cdot h; \qquad (12.101a)$$

čia β – tūrio plėtimosi koeficientas, kai $\rho < \rho_0$.

Natūrali konvekcija atsiranda ten, kur dėl temperatūros nevienodumo fluido masėje susidaro skirtingo tankio sritys. Aukštesnės temperatūros, t. y. mažesnio tankio, masės dalelės kyla į viršų, o žemesnės temperatūros – leidžiasi žemyn. Aparate susidaro fluido konvekcinės srovės, kurios ir perneša šilumą. Šilumos atidavimo koeficientas priklauso nuo temperatūrų skirtumo, kūno matmenų (ypač aukščio), šiluminių fizikinių fluido parametrų (ypač μ ir β) ir nuo naudojamo paviršiaus orientacijos.

Kai paviršius, kurį apteka fluidas, yra mažesnių matmenų negu fluido užimama ertmė, tokią natūraliąją konvekciją įprasta vadinti laisvąja, arba nesuvaržytąja neapribotoje erdvėje (pvz., radiatorius šildomoje patalpoje). Kai fluido ertmės matmenys yra mažesni už aptekamo paviršiaus matmenis, tokia natūralioji konvekcija vadinama nelaisvąja, arba suvaržytąja (pvz., oro konvekcija tarp dviejų langų stiklų arba fluido konvekcija žiediniame kanale tarp dviejų bendraašių vamzdžių).



12.15 pav. Šilumos atidavimo koeficiento α kitimo schema, kai fluidas natūraliai nesuvaržytas teka vertikaliu paviršiumi

Esant natūraliajai laisvajai konvekcijai, fluidas teka tik pasienio sluoksniu iš pradžių laminariškai, o toliau – turbulentiškai (12.15 pav.). Laikoma, kad laminarinis tekėjimas vyrauja tol, kol sandauga $Gr \cdot Pr < 2 \cdot 10^7$. Šiluma intensyviausiai atiduodama tekėjimo pradžioje; toliau, storėjant laminariniam pasienio sluoksniui, šilumos atidavimo intensyvumas mažėja, o tekėjimo pobūdžiui pasikeitus į turbulentinį, vėl padidėja.

Vidutinį viso paviršiaus šilumos atidavimo koeficientą α galima apskaičiuoti pagal šią kriterijų lygtį (M. Michejevas):

$$Nu = c(Gr \cdot Pr)^n; \qquad (12.102)$$

čia $Nu = \frac{\alpha \cdot l}{\lambda}$; $Gr = \frac{g \cdot l^3 \cdot \rho^2}{\mu^2} \cdot \beta \cdot \Delta t$; $Pr = \frac{\nu}{a}$; l – būdingasis matmuo: horizontalių vamzdžių ir rutulių – skersmuo d, vertikalių vamzdžių ir plokščių – aukštis h, horizontalių plokščių – mažesniojo šono ilgis.

Lygtis tinka ir skysčiams, ir dujoms, kai Pr $\geq 0,7$. Koeficiento c ir laipsnio rodiklio n vertės priklauso nuo Grashofo (Gr) ir Prandtlio (Pr) kriterijų sandaugos vertės.

Šioje lygtyje fluido fizikiniai parametrai parenkami pagal vidutinę pasienio sluoksnio temperatūrą $t_m = 0,5 \cdot (t_f + t_p)$, o būdingasis geometrinis matmuo imamas toks: jei paviršius vertikalus, imamas jo aukštis h, jei horizontalus vamzdis, – jo skersmuo d, jei horizontali plokštė, – jos plotis b.

Dydžius c ir n reikia parinkti pagal Gr ir Pr sandaugą iš 12.3 lentelės.

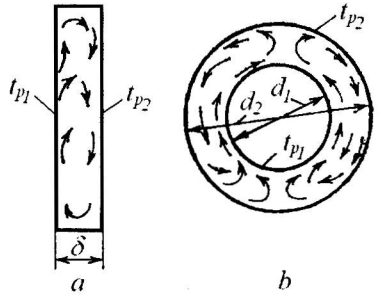
12.3 lentelė. Dydžių c ir n vertės

Paviršius ir jo šildymo pobūdis	$Gr \cdot Pr$	n	c
Vertikalus paviršius ir horizontalus vamzdis	$0,001...5 \cdot 10^2$	0,125	1,18
Vertikalus paviršius ir horizontalus vamzdis	$5 \cdot 10^2...2 \cdot 10^7$	0,25	0,54
Vertikalus paviršius ir horizontalus vamzdis	$2 \cdot 10^7...10^{13}$	0,333	0,135
Horizontali plokštė:			
šildomas tik apatinis arba aušinamas tik viršutinis paviršius	$10^5...5 \cdot 10^6$	0,3	0,223
šildomas tik viršutinis arba aušinamas tik apatinis paviršius	$10^5...5 \cdot 10^6$	0,16	1,5
apatinis paviršius, kai šildomi abu paviršiai, arba viršutinis paviršius, kai aušinami abu paviršiai	$10^5...5 \cdot 10^6$	0,34	0,104
viršutinis paviršius, kai šildomi abu paviršiai, arba apatinis paviršius, kai aušinami abu paviršiai	$10^5...5 \cdot 10^6$	0,16	1,5

Jei šilumą atiduodantis paviršius nukreiptas į viršų, α didiname 30 %, jei nukreiptas žemyn, – mažiname 30 %.

Kai paviršius yra pasviręs kampu φ nuo vertikalios padėties ir $\varphi \leq 60°$, šilumos atidavimo koeficientas α apskaičiuojamas taip kaip vertikaliai plokštei ir padauginamas iš daugiklio ε_φ, kuris nustatomas iš šios lygties:

$$\varepsilon_\varphi = (\cos\varphi)^{0,25}. \qquad (12.103)$$



12.16 pav. Natūralioji konvekcija apribotoje ertmėje tarp lygiagrečių plokščių (*a*) ir tarp cilindrinių paviršių (*b*); $t_{p1} > t_{p2}$

Esant natūraliajai suvaržytajai konvekcijai, dažniausiai reikia nustatyti šilumos pernašą tarp dviejų fluidą ribojančių skirtingos temperatūros paviršių. Tokiu atveju šilumos pernašai skaičiuoti patogu naudoti šilumos laidumo lygtis, tik į jas reikia įrašyti ekvivalentinį šiluminio laidžio koeficientą λ_e ((12.106) lygtis), kuriuo įvertinama šilumos pernaša laidumu ir konvekcija. Tada bendras šilumos srautas tarp dviejų lygiagrečių paviršių, kuriuos skiria fluidas (12.16 pav., *a*), apskaičiuojamas taip:

$$Q = \frac{\lambda_e}{\delta} \cdot \left(t_p - t_p\right) \cdot F. \qquad (12.104)$$

Jei paviršiai yra bendraašiai cilindrai (12.16 pav., *b*),

$$Q = \frac{t_{p_1} - t_{p_2}}{\frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{1}{\lambda_e} \cdot \ln \frac{d_2}{d_1}} l; \qquad (12.105)$$

$$\lambda_e = \lambda \cdot \varepsilon_k; \qquad (12.106)$$

čia λ – fluido šiluminio laidžio koeficientas, W/(m·K); ε_k – konvekcinis koeficientas, kuriuo įvertinamas šilumos pernašos padidėjimas dėl konvekcijos. ε_k apskaičiuojamas taip:

$$\varepsilon_k = c\left(Gr \cdot \mathrm{Pr}\right)^n. \qquad (12.107)$$

M. Michejevas nurodo, kad nepriklausomai nuo plyšyje esančio fluido tekėjimo pobūdžio ε_k apskaičiuojamas pagal tokią lygtį:

$$\varepsilon_k = 0{,}18 \cdot (Gr \cdot Pr)^{0{,}25}. \qquad (12.107a)$$

Šioje lygtyje būdinguoju matmeniu pasirinktas plyšio plotis δ, nesvarbu, kokios jis formos.

Dydžiai c ir n parenkami pagal Gr ir Pr sandaugą taip:

jei $Gr \cdot Pr \leq 10^5$, tai $c = 1$, $n = 0$;

jei $Gr \cdot Pr = 10^3 \ldots 10^6$, $c = 0{,}105$, $n = 0{,}3$;

jei $Gr \cdot Pr = 10^6 \ldots 10^{10}$, $c = 0{,}4$, $n = 0{,}2$.

(12.107) lygtyje būdinguoju matmeniu imamas atstumas tarp paviršių δ, o būdingąja temperatūra laikoma $t_m = 0{,}5 \cdot (t_{p_1} + t_{p_2})$; čia t_{p_1} ir t_{p_2} – pirmojo ir antrojo paviršių temperatūros.

Šilumos atidavimas konvekcija ir spinduliuote nuo įrenginių paviršiaus į aplinką. Šis atvejis svarbus parenkant aparatų izoliacijos storį. Suminį šilumos atidavimo į aplinką nuo uždarose patalpose esančių aparatų paviršių, kurių temperatūra $t = 50...350$ °C, koeficientą α_o, W/(m^2·K), apytiksliai apskaičiuojame pagal šią empirinę lygtį:

$$\alpha_0 = 9{,}3 + 0{,}058 \cdot \Delta t_{iš}; \qquad (12.108)$$

čia $\Delta t_{iš}$ – paviršiaus ir aplinkos temperatūrų skirtumas, °C.

Tiksliau skaičiuojant šilumos srauto į aplinką (šilumos nuostolius) nuo įkaitusių šiluminių įrenginių (tunelinių krosnių, džiovyklų ir pan.) dydį, būtina atsižvelgti į šilumos srauto kryptį, nes šilumos pernašos konvekcijos būdu vertikalia arba horizontalia kryptimi nuo šiluminių įrenginių paviršių sąlygos yra labai skirtingos. Atsižvelgiant į tai, bendras šilumos atidavimo konvekcija ir spinduliuote koeficientas, W/(m^2·K), apskaičiuojamas pagal lygtį

$$\alpha_{iš} = \alpha_{sp} + \alpha_k = K_d \cdot \sqrt[4]{T_{iš} - T_a} + \frac{5{,}7 \cdot \varepsilon \cdot [(T_{iš}/100)^4 - (T_a/100)^4]}{T_{iš} - T_a}; \qquad (12.108a)$$

čia K_d – šilumos srauto sklidimo kryptį įvertinantis daugiklis; $K_d = 3{,}3$ – horizontaliems paviršiams, atiduodantiems šilumą į viršų, $K_d = 2{,}6$ – vertikaliems sienų paviršiams, atiduodantiems šilumą horizontalia kryptimi, $K_d = 1{,}6$ – horizontaliems paviršiams, atiduodantiems šilumą į apačią; $T_{iš}$ – išorinio paviršiaus temperatūra, K; T_a – aplinkos oro temperatūra, K; ε – medžiagos paviršiaus juodumo laipsnis.

12.3.7. Šilumos atidavimas kondensuojantis garams

Garai kietojo kūno paviršiuje kondensuojasi tuomet, kai jo temperatūra t_p tampa žemesnė už garų soties temperatūrą t_s ($t_p < t_s$). Tokią kondensaciją įprasta vadinti paviršine.

Paviršinė kondensacija gali vykti dviem būdais. Pirmuoju atveju kondensatas ant šalto paviršiaus renkasi pavieniais lašais, t. y. skystis nedrėkina paviršiaus, – turime lašelinę kondensaciją. Bet dažniau lašai drėkina paviršių ir susilieja į plėvelę. Tai plėvelinė kondensacija. Susidariusi plėvelė pradžioje teka laminariškai, vėliau, veikiama gravitacijos ir trinties jėgų, ji ima gana taisyklingai banguoti, o didėjant Re_p, bangavimas pereina į turbulentinį tekėjimą.

Technikoje dažniau naudojama ir geriau ištirta yra plėvelinė kondensacija, šilumos atidavimo koeficientas didesnis būna lašelinės kondensacijos atveju.

Aptarkime atskirus svarbius šilumos atidavimo kondensacijos procese atvejus.

A. Šilumos atidavimas garams kondensuojantis ant vertikalių vamzdžių ir sienelių.

V. Nuseltas laikė, kad, kai laminarinė plėvelė teka nejudamų garų aplinkoje ir $t_s = const$ bei $t_p = const$, šiluma plėvelėje pernešama tik šilumos laidumu. Tardamas, jog tekėjimą lemia tik gravitacijos ir trinties jėgos, jis gavo šią vidutinio šilumos atidavimo koeficiento vertę:

$$\alpha = 0{,}943 \cdot \sqrt[4]{\frac{\lambda^3 \cdot \rho^2 \cdot g \cdot r}{\mu \cdot \Delta t \cdot h}} = 0{,}925 \cdot \lambda \cdot \sqrt[3]{\frac{\rho^2 \cdot g \cdot r}{\mu \cdot h}} \cdot q^{-1/3}. \quad (12.109)$$

Naudojantis šia išraiška, α galima apskaičiuoti imant $\Delta t = t_s - t_p$. Ši lygtis gali turėti ir kiek kitokią išraišką. Jei tarsime, kad $Re_p = \frac{4 \cdot \Gamma}{\mu} = \frac{4 \cdot q \cdot h}{r \cdot \mu}$ ir būdingasis matmuo bus išreiškiamas $l = \left(\frac{\nu^2}{g}\right)^{1/3}$, tuomet šią lygtį lengvai pertvarkysime taip:

$$\frac{\alpha}{\lambda} \cdot \left(\frac{\nu^2}{g}\right)^{1/3} = 1{,}47 \cdot Re_p^{-1/3}. \quad (12.109a)$$

Naudojant abi šias lygtis, taikomi tokie realūs pataisos koeficientai:

$$\alpha_k = \alpha \cdot \varepsilon_t \cdot \varepsilon_R \cdot \varepsilon_w \cdot \varepsilon_o \cdot \varepsilon_\varphi. \quad (12.110)$$

Šie pataisos koeficientai nustatomi taip. Pataisos koeficientas ε_t įvertina plėvelės temperatūros kitimą nuo t_p iki t_s, o kartu ir jos fizikinių savybių kitimą:

$$\varepsilon_t = \left(\frac{Pr}{Pr_p}\right)^{0{,}25}.$$

Pataisos koeficientas ε_R įvertina plėvelės bangavimą pereinant į turbulentinio pobūdžio tekėjimą:

- P. Kapicos pataisos koeficientas $\varepsilon_R = 1{,}21$;

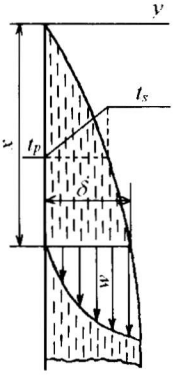
- A. Labuncovo pataisos koeficientas $\varepsilon_R = (\frac{Re_p}{4})^{0,04}$;
- G. Gimbučio pataisos koeficientas $\varepsilon_R = 1 + 0,03 \cdot Re_p^{0,8} \cdot Pr^{0,6}$.

Pataisos koeficientas ε_o įvertina oro ir nesikondensuojančių dujų priemaišas garuose. Oro priemaišos mažina garų dalinį slėgį, o kartu t_s ir temperatūrų skirtumą $t_s - t_p$. Kondensacija blogėja, mažėja šilumos atidavimo koeficientas. Tai įvertinama lygtimi

$$\varepsilon_o = 0,6 \cdot c^{-0,11};$$

čia c – oro priemaiša, išreikšta masės procentais.

Lygtys galioja, kai $c = 0,1...4$ %. Tai kelia didelius reikalavimus kondensatorių sandarumui.



12.17 pav. Paviršiumi tekanti kondensato plėvelė

Pataisos koeficientas ε_w įvertina garų srauto greičio įtaką šilumos atidavimo procesui. Iš 12.17 pav. matome, kad, jei plėvelės ir garų srauto greičių kryptys sutampa, tai $\varepsilon_w > 1$. Jei srauto ir plėvelės greičiai nesutampa, tai pradžioje $\varepsilon_w < 1$, bet vėliau jis didėja ir viršija vienetą ($\varepsilon_w > 1$).

Dažniau pasitaiko, kad plėvelė yra garų srauto nuplėšiama ir α didėja. Šiam atvejui pasiūlytas toks pataisos koeficientas:

$$\varepsilon_w = 1 + 0,013 \cdot \left(\frac{\rho_g \cdot w_g^2}{g \cdot \rho_s \cdot l} \right)^{0,5};$$

čia $l = \left(\frac{\nu_s^2}{g} \right)^{1/3}$ – būdingasis plėvelės matmuo.

Kartais su šalta sienele liečiasi perkaitinti vandens garai. Tokiu atveju į (12.109) ir (12.109a) lygtis vietoj garavimo šilumos r įrašoma jų entalpija $h' = r + (h - h'')$.

Kondensacija ant kampu φ pasvirusios sienelės skiriasi tuo, kad vietoj g į lygtis įrašoma $g \cdot \sin\varphi$ ir galutinis pataisos koeficientas vertikalios sienelės lygtyse yra $\varepsilon_\varphi = (\sin\varphi)^{1/4}$.

B. Šilumos atidavimas, kai garai kondensuojasi ant horizontalaus vamzdžio.

Šilumos atidavimo koeficientas šiuo atveju skaičiuojamas analogiškai:

$$\alpha = 0{,}725 \cdot \left(\frac{g \cdot \lambda^3 \cdot \rho^2 \cdot r}{\mu \cdot \Delta t \cdot d_i} \right)^{1/4} = 0{,}645 \cdot \lambda \cdot \left(\frac{g \cdot \rho^2 \cdot r}{\mu \cdot d_i} \right)^{1/3} \cdot q^{-1/3}. \tag{12.111}$$

Norint padidinti α, kondensatoriuose naudojami mažo skersmens vamzdžiai (d_i = *10...20* mm) arba vertikaliuose vamzdžiuose padaromos specialios briaunos plėvelei numesti.

Koreguotas koeficientas $\alpha_k = \alpha \cdot \varepsilon_o \cdot \varepsilon_t \cdot \varepsilon_N$;

ε_N – pataisos koeficientas dėl vamzdelių išdėstymo vieno virš kito. *N*-osios eilės šilumos atidavimas apskaičiuojamas naudojant pataisos koeficientą:

$$\varepsilon_N = \frac{1}{N^{1/4}};$$

čia *N* – vamzdžio eilės numeris skaičiuojamas nuo viršaus plėvelės tekėjimo kryptimi, kai vamzdžiai išdėstyti vienas virš kito.

C. Šilumos atidavimas, kai garai kondensuojasi horizontalaus vamzdžio viduje.

Šiuo atveju, palyginti su išorine kondensacija, sąlygos pablogėja, nes vamzdžio viduje dalį paviršiaus ploto užima susirinkęs kondensatas.

Šilumos atidavimui skaičiuoti J. Chato siūlo naudoti tokią pat lygtį, bet su kitais koeficientais:

$$\alpha = 0{,}555 \cdot \left(\frac{g \cdot \lambda^3 \cdot \rho^2 \cdot r}{\mu \cdot \Delta t \cdot d_v} \right)^{1/4} = 0{,}456 \cdot \lambda \cdot \left(\frac{g \cdot \rho^2 \cdot r}{\mu \cdot d_v} \right)^{1/3} \cdot q^{-1/3}. \tag{12.112}$$

Jei *Re* skaičiuojamas garams įtekant, kai nustatomas garų srauto greitis visame vamzdžio skerspjūvio plote,

$$w'' = \frac{4 \cdot G_g}{\pi \cdot d_v^2 \cdot \rho_g} \tag{12. 112a}$$

ir

$$Re_g = \frac{w'' \cdot d_v}{\nu_g} = \frac{4 \cdot G_g}{\pi \cdot d_v \cdot \mu_g}. \tag{12.112b}$$

(12.112) lygtis galioja, kol $Re_g < 35000$.

D. Šilumos atidavimas lašelinės kondensacijos atveju.

Kadangi praktikoje lašelinė kondensacija nevyksta be specialių priemonių (paviršiaus tepimo, priemaišų maišymo į garus), ji nėra kaip reikiant ištyrinėta. Vandens garų kondensacijos atveju galima imti: $\alpha = 51100 + 2045 \cdot t_s$, W/(m^2·K), kai $25\ °C < t_s < 100\ °C$, ir $\alpha = 255600$ W/(m^2·K), kai $t_s > 100\ °C$.

12.3.8. Šilumos atidavimas skysčiams verdant

Virimas – sudėtingas reiškinys. Jo būdingas bruožas – didelė šilumos atidavimo koeficiento vertė, o kartu ir galimybė pernešti didelio tankio šilumos srautą. Tai panaudojama garo generatoriuose, branduoliniuose energetiniuose reaktoriuose ir raketinėje technikoje. Kai visas skystis yra įšildytas iki soties temperatūros t_s, turime *tūrinį virimą*. Jei tik plono prie sienelės esančio skysčio sluoksnio temperatūra $\geq t_s$, *virimas* yra *paviršinis*. Gali būti, kad šiluma tiekiama ne per paviršių, bet visame tūryje, pvz., branduoliniame reaktoriuje; tuo atveju tai yra *homogeninis* (vienalytis) *virimas*.

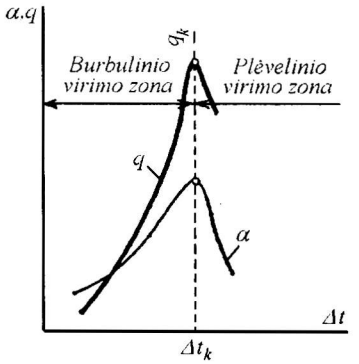
Chemijos pramonėje skysčių virimo ir garavimo procesai gana dažni. Jie neatskiriamai susiję su šilumos pernaša. Kad skystis virtų ar intensyviai garuotų, jį reikia šildyti. Iki virimo temperatūros pašildyto skysčio masėje, pirmiausia ties šildomuoju paviršiumi, kur skysčio sluoksnis yra šiek tiek perkaitintas, pradeda darytis garo burbuliukai. Jų matmenys, forma ir skaičius priklauso nuo šildymo intensyvumo, paviršiaus nelygumo, švarumo ir drėkinimo. Burbuliukų susidarymo židiniai vadinami garavimo centrais. Dažniausiai tai būna įvairūs šildomojo paviršiaus nelygumai, kur adhezinės jėgos mažiausios.

Išaugęs burbuliukas atitrūksta nuo paviršiaus, kai jį veikiančių dinaminių jėgų ir Archimedo jėgų suma tampa didesnė už skysčio paviršiaus įtempio jėgas. Burbuliukams kylant į paviršių, skystis turbulizuojasi, be to, didėja burbuliukų tūris, nes į jų vidų garuoja skystis. Toks skysčio virimo procesas vadinamas *burbuliniu*. Burbulinio virimo šilumos pernašos procesą sudaro šilumos atidavimas nuo šildomojo paviršiaus skysčiui ir šilumos perdavimas burbuliukų vidiniam paviršiui. Šio proceso intensyvumas priklauso nuo tiekiamo šilumos srauto. Intensyviau kaitinant šildomąjį paviršių, didėja paviršiaus ir verdančio skysčio temperatūrų skirtumas, labiau perkaista paviršių dengiantis skysčio sluoksnis, daugiau jame susidaro garavimo centrų ir garo burbuliukų, kurie kildami labiau maišo skystį ir intensyvina šilumos atidavimą.

Padidinus šildymo srauto tankį iki tam tikros vertės q_k (pvz., verdant vandeniui atmosferos slėgyje, $q_k = 1{,}2 \cdot 10^6$ W/m^2), paviršiuje susidaro tiek daug garų burbuliukų, kad jie susilieję padengia paviršių ištisine perkaitintojo garo plėvele. Toks virimas vadinamas *plėveliniu*. Perkaitintojo garo plėvelė blogai praleidžia šilumą (šis reiškinys vadinamas virimo krize), todėl, esant tam pačiam šildymo srauto tankiui, ima didėti paviršiaus temperatūra, kyla pavojus,

kad paviršius perkais ir suirs, o šilumos perdavimo skysčiui intensyvumas sumažėja.

Kai virimas burbulinis, didėjant šildymo srauto tankiui q, šildymo paviršiaus šilumos atidavimo skysčiui koeficientas didėja iki tam tikros maksimalios vertės, o jei virimas plėvelinis, – staiga ima mažėti (12.18 pav.).



12.18 pav. α ir q priklausomybė nuo Δt, verdant vandeniui

Skysčio paviršinis virimas būna dvejopas: *dideliame tūryje* ir *skysčiui tekant kanalais.*

Kai skystis verda dideliame tūryje, vidutines šilumos atidavimo koeficiento vertes galima apskaičiuoti pagal šią kriterijų lygtį:

$$Nu = C \cdot Re_m^n \cdot Pr^{1/3}. \quad (12.113)$$

Šioje lygtyje dydžių C ir n vertės parenkamos pagal modifikuotą Reinoldso kriterijų: kai $Re_m \leq 0{,}01$, tai $C = 0{,}0625$, $n = 0{,}5$; kai $Re_m = 0{,}01$, tai $C = 0{,}125$, $n = 0{,}65$.

Modifikuoto Reinoldso kriterijaus išraiška yra tokia:

$$Re_m = \frac{w_g \cdot d_o}{\nu'}, \text{ o } d_o = \frac{c' \cdot \rho' \cdot \sigma \cdot t_s}{(r \cdot \rho'')^2}; \quad (12.114)$$

čia d_0 – dydis, proporcingas paviršiuje atsiradusio garo burbuliuko skersmeniui; c' – verdančio skysčio savitoji šiluma, J/(kg K); σ – skysčio paviršiaus įtempis, N/m; ρ' – verdančio skysčio tankis, kg/m^3; t_s – sočiųjų garų temperatūra; r – garavimo šiluma, J/kg; ρ'' – sausų sočiųjų garų tankis, kg/m^3; w_g – tariamasis garavimo greitis, m^3/(m^2·s), kurį galima apskaičiuoti taip:

$$w_g = \frac{q}{\rho'' \cdot r}; \quad (12.114a)$$

čia q – skysčiui virti tiekiamo šilumos srauto tankis, W/m^2.

(12.113) lygties kriterijai reiškiami taip:

$$Nu = \frac{\alpha \cdot d_0}{\lambda'}; \; Pr = \frac{\nu'}{a'};$$

čia α – šildomojo paviršiaus šilumos atidavimo verdančiam skysčiui koeficientas, W/(m^2·K); d_0 – dydis, apskaičiuojamas pagal (12.114) lygtį; λ' – verdančio skysčio šiluminio laidžio koeficientas, W/(m K); ν' – verdančio skysčio kinematinė klampa, m^2/s; a' – verdančio skysčio temperatūrinio laidžio koeficientas, m^2/s.

Kaip matyti iš (12.113) ir (12.114) lygčių, šilumos atidavimo koeficientas α yra tik sočiųjų garų slėgio, temperatūros ir tiekiamo šilumos srauto funkcija, todėl ir nurodomos šio tipo funkcijos atskirų skysčių koeficientui α apskaičiuoti:

verdant vandeniui,

$$\alpha = 4{,}435 \cdot p_s^{0{,}15} \cdot q^{0{,}7}, \qquad (12.115)$$

arba

$$\alpha = 142{,}3 \cdot p_s^{0{,}5} \cdot \Delta t^{2{,}33}; \qquad (12.116)$$

čia p_s – sočiųjų garų absoliutusis slėgis, MPa. Šios lygtys taikytinos, kai $p_s = 0{,}1...4{,}0$ MPa.

Dažnai skystis verda tekėdamas įvairių aparatų kanalais. Tokiu atveju šilumos atidavimo procesui, be jau nagrinėtų veiksnių, dar turi įtakos tekėjimo režimas, greitis, kanalo forma, jo matmenys. Tada šilumos atidavimo koeficientą α reikia apskaičiuoti pagal šią lygtį:

$$\alpha = \alpha' \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{\alpha_k}{\alpha'}\right)^2}; \qquad (12.117)$$

čia α' – šilumos atidavimo koeficientas, apskaičiuotas taip pat, kaip tada, kai verdama dideliame tūryje, W/(m^2·K); α_k – šilumos atidavimo koeficientas, apskaičiuotas taip pat kaip neverdančio tekančio skysčio, W/(m^2·K).

A. Virimas ir šilumos atidavimas dideliame skysčio tūryje.

Intensyvaus burbulinio virimo atveju šilumos atidavimą lemia skysčio sluoksnio po burbuliuku, prieš pat šiam atsiplėšiant nuo paviršiaus, šiluminis pasipriešinimas:

$$\alpha \approx \frac{\lambda}{\delta_{ef}}. \qquad (12.118)$$

Tikslus δ_{ef} įvertinimas yra labai sudėtingas ir ne iki galo ištirtas procesas. D. Labuncovas, remdamasis bandymų duomenimis teigia, kad

$$\delta_{ef} = c\sqrt{\frac{\nu \cdot R_{min}}{w''}}. \qquad (12.119)$$

Garavimo greitis apskaičiuojamas pagal šilumos balanso lygtį:

$$w'' = \frac{q}{r \cdot \rho''}. \qquad (12.120)$$

Minimalus ant paviršiaus nelygumų susidarančio burbuliuko spindulys R_{min} apskaičiuojamas pagal Laplaso lygtį:

$$R_{min} = \frac{2 \cdot \sigma}{p'_s \cdot \Delta t} \cdot \frac{\rho'}{\rho' - \rho''}. \qquad (12.121)$$

Slėgio išvestinę pagal soties temperatūrą aprašo Klauzijaus lygtis:

$$p'_s = \left(\frac{\partial p}{\partial t}\right)_s = \frac{r \cdot \rho' \cdot \rho''}{T_s \cdot (\rho' - \rho'')}. \qquad (12.122)$$

Be to, akivaizdu, kad $q = \alpha \cdot \Delta t$. (12.123)

(12.123, 12.122, 12.121, 12.120) lygtis įrašę į (12.119) ir (12.119) lygtį – į (12.118), gauname:

$$\alpha = b\left(\frac{\lambda^2}{\nu \cdot \sigma \cdot T_s}\right)^{1/3} \cdot q^{2/3}. \qquad (12.124)$$

Visi fizikiniai dydžiai šioje lygtyje randami pagal soties temperatūrą. Apdorojus labai daug eksperimentų duomenų koeficientas b apskaičiuojamas pagal lygtį

$$b = 0{,}075 \cdot \left[1 + 10 \cdot \left(\frac{\rho''}{\rho' - \rho''}\right)^{2/3}\right]. \qquad (12.125)$$

Tai žinoma D. Labuncovo lygtis, aprašanti šilumos atidavimo koeficiento vertę burbulinio virimo atveju. Ji patikrinta tiriant daug įvairių skysčių. Rezultatų sklaida ±35 %. Ją lemia ne matavimų tikslumas, o šildymo paviršių mikrogeometrinės savybės, jų oksidacijos laipsnis.

Remiantis bendru (12.125) lygties pavidalu ir žinant, kad kiekvieno skysčio ρ', ρ'', λ, $\nu = f(p_s) = f_1(t_s)$, gaunamos paprastesnės lygtys. Pavyzdžiui, vandeniui gauta tokia labai dideliam slėgių diapazonui tinkanti lygtis:

$$\alpha_v = \frac{5{,}15 \cdot p_s^{0{,}18}}{1 - 0{,}0045 \cdot p_s} \cdot q^{2/3}; \qquad (12.126)$$

čia parametrų vertės yra išreikštos tokiais vienetais: α_v – W/(m^2·K); p_s – MPa, q – W/m^2.

Kitiems skysčiams ir tirpalams ši lygtis gali būti panaudota, atsižvelgiant į jų šilumines fizikines savybes:

$$\alpha = \left(\frac{c \cdot \rho \cdot \mu_v}{c_v \cdot \rho_v \cdot \mu}\right)^{0{,}4} \cdot \left(\frac{\lambda}{\lambda_v}\right)^{0{,}6} \cdot \alpha_v. \qquad (12.127)$$

Nustatę α ir q burbulinio virimo atveju, visada turime patikrinti, ar, esant per dideliam tiekiamos šilumos srauto tankiui q_k, nepasiekta virimo krizė, kuri dažniausiai esti neleistina. q_k apskaičiuojame pagal šią lygtį:

$$q_k \cong 0{,}15 \cdot r \cdot \sqrt{\rho''} \cdot \sqrt[4]{\sigma \cdot g \cdot \rho'} \,. \qquad (12.128)$$

Šioje lygtyje šiluminiai fizikiniai parametrai parenkami pagal sočiųjų garų temperatūrą t_s.

B. Šilumos atidavimas skysčiui verdant gravitacinėje plėvelėje.

Šiuo atveju vertikaliu vamzdžio ar sienelės paviršiumi skystis tiekiamas, kai jo temperatūra lygi sočiųjų garų temperatūrai $t_f = t_s$. Šildymo sienelės temperatūra $t_p > t_s$, skystis verda dėl susidariusio temperatūrų skirtumo $t_p - t_s$. Tam, kad visas paviršius būtų drėkinamas, skysčio plėvelė neardoma, ji turi virti dėl paviršinio garavimo.

Plėvelės tekėjimo pobūdį nusako šie dydžiai:

- linijinis laistymo plėvelės tankis Γ, kg/(m·s), kuris apibrėžiamas skysčio debitu m, kg/s, tenkančiu vienam metrui šlapios sienelės perimetro U, t. y.

$$\Gamma = \frac{m}{U}. \qquad (12.129)$$

- plėvelės Reinoldso kriterijus, kuris šiuo atveju nustatomas taip:

$$Re_p = \frac{w \cdot d_e}{\nu} = \frac{w}{\nu} \cdot \frac{4 \cdot f}{U} = \frac{4w \cdot f \cdot \rho}{\nu \cdot U \cdot \rho} = \frac{4 \cdot m}{\nu \cdot \rho \cdot U} = \frac{4 \cdot \Gamma}{\mu}$$

arba $$Re_p = \frac{4 \cdot \Gamma}{\mu}; \qquad (12.130)$$

čia f – tekančios plėvelės skerspjūvio plotas, m^2.

Tyrimais nustatyta, kad iki $Re_p = 1600$ plėvelės tekėjimas yra laminarinis, vėliau ji ima banguoti ir tekėjimas tampa turbulentinis.

V. Nuseltas įrodė, kad, jei plėvelė, veikiama gravitacijos ir trinties jėgų, garuoja nuo paviršiaus, o garai nejuda, vidutiniam šilumos atidavimo koeficientui apskaičiuoti laminarinio tekėjimo atveju taikoma ši lygtis:

$$Nu_p = \frac{\alpha \cdot l}{\lambda} = \sqrt[3]{\frac{4}{3}} \cdot Re_p^{-1/3} \approx 1{,}1 \cdot Re_p^{-1/3}; \qquad (12.131)$$

čia l – būdingasis plėvelės matmuo; $l = \left(\frac{\nu^2}{g}\right)^{1/3}$.

Iš tikrųjų plėvelė yra banguota ir turbulizuota, todėl šilumos atidavimo koeficientui apskaičiuoti naudojamos sudėtingesnės kriterinės lygtys.

G. Gimbutis su bendraautoriais nustatė, kad nepriklausomai nuo plėvelės tekėjimo pobūdžio šilumos atidavimo koeficientą galima apskaičiuoti pagal tokią pusiau empirinę lygtį:

$$Nu_p = 1{,}1 \cdot Re_p^{-1/3} \cdot (1 + 0{,}02 \cdot Re_p^{0{,}2} + 0{,}0009 \cdot Re_p^{0{,}85} \cdot Pr^{0{,}65}). \quad (12.132)$$

Ši lygtis galioja tuo atveju, kai nuo plėvelės paviršiaus susidaręs garų srautas plėvelės pastebimai mechaniškai neplėšo, neardo. Bandymai rodo, kad garai, kurių greitis $w < 10$ m/s, esant atmosferos ar jam artimam slėgiui, fizinio poveikio plėvelei neturi.

I. Domanskis pateikė visais plėvelės tekėjimo atvejais tinkančią lygtį plėvelės šilumos atidavimo koeficientui apskaičiuoti:

$$Nu_p = \left(\frac{1{,}35}{Re_p} + 10^{-4} \cdot Re_p^{0{,}7} \cdot Pr \right)^{1/3}. \quad (12.133)$$

Pagal fizikinę struktūrą abi lygtys vienodos, kadangi $(1{,}35 / Re_p)^{1/3} \cong 1{,}1 \cdot Re_p^{-1/3}$. Ši lygtis irgi teisinga tuo atveju, kai plėvelė mechaniškai neardoma garais ir, kaip tvirtina I. Domanskis, ji galioja iki $q \leq 2 \cdot q_o$. Čia q_o – plėvelės paviršinio garavimo intensyvumas. Jis apskaičiuojamas pagal šią empirinę lygtį:

$$q_o = \left[27 \cdot \left(\frac{\alpha \cdot \rho'' \cdot r}{c_p \cdot \rho' \cdot Re_p^{0{,}55}} \right)^{0{,}5} + 0{,}75 \cdot \alpha \cdot \left(\frac{\sigma \cdot T_s}{\lambda \cdot \rho'' \cdot r} \right)^{0{,}5} \right]^2; \quad (12.134)$$

čia α – šilumos atidavimo skysčio plėvelei koeficientas, W/(m^2·K); ρ'', ρ' – atitinkami garų ir skysčio tankiai, kg/m^3; c_p – skysčio savitoji šiluma, J/(kg·K); λ – skysčio šiluminio laidžio koeficientas, W/(m·K); T_s – skysčio virimo temperatūra, K.

Abi anksčiau pateiktos lygtys ieškomą α vertę nusako priklausomybe $\alpha = \alpha(\Gamma)$. Kartais tokie skaičiavimai gali būti ne visai patogūs. Tokiu atveju verdančiosios plėvelės Re_p gali būti išreikštas paviršiaus šilumos srauto tankiu, W/m^2. Iš plėvelės šilumos balanso lygties gauname:

$$Q = m \cdot r = q \cdot F = \alpha \cdot \Delta t \cdot h \cdot U; \quad (12.135)$$

iš čia

$$\frac{m}{U} = \Gamma = \frac{\alpha \cdot \Delta t \cdot h}{r} = \frac{q \cdot h}{r};$$

$$Re_p = \frac{4 \cdot \Gamma}{\mu} = \frac{4 \cdot q \cdot h}{r \cdot \mu} = \frac{4 \cdot \alpha \cdot \Delta t \cdot h}{r \cdot \mu}. \qquad (12.136)$$

(12.135) ir (12.136) lygtyse ieškomasis dydis α išreiškiamas ryšiu $\alpha = \alpha_1(q)$ arba $\alpha = \alpha_2(\Delta t)$. Abu ryšiai kai kuriais atvejais patogesni nei $\alpha = \alpha_1(\Gamma)$.

Eksploatuojant ir projektuojant plėvelinius aparatus, siekiama, kad būtų drėkinamas visas vidinis (ar išorinis) vamzdžių paviršius. Todėl garavimo proceso pabaigoje paviršiaus apačioje turi išlikti minimalus laistymo tankis, užtikrinantis visišką drėkinimą. Be to, tokiu atveju atsižvelgiama į tai, kad nuo skysčio paviršiaus atsiplėšdami garai kartu su savimi neša skysčio iki 20 % garų debito, t. y. drėgnųjų garų drėgnumo laipsnis $y = 0,2$. Tuomet

$$\Gamma_f = \frac{m_f}{U} \cdot (1 - y) \geq \Gamma_{\min};$$

čia m_f – plėvele tekančio koncentruoto tirpalo debitas, kg/s;

$$\Gamma_{min} = \mu_f \cdot \left(\frac{\sigma}{v_f^{4/3} \cdot \rho_f \cdot g^{1/3}} \right)^{0,625}.$$

Nustatome vamzdelių skaičių n_{max}, vnt. Plėvelinio garintuvo (jei plėvelė teka vamzdelių viduje)

$$n_{max} = \frac{\Gamma_f}{\pi \cdot d_v}.$$

Taip pat negalima parinkti per mažai vamzdelių, nes tuomet juose didėja garų greitis ir daugiau pašalinama skysčio. Kai $y \leq 0,2$, garų greitis arti plėvelės negali viršyti

$$w_g = 3,2 \cdot 10^{-4} \frac{\sigma}{\rho''} \cdot \left(\frac{\rho'}{\rho''} \right)^{1/2}.$$

Minimalus vamzdelių skaičius

$$(m_{pr} - m_k) = m_w \text{ ir } m_w = n_{min} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot d_v^2 \cdot \rho'' \cdot w_g;$$

čia $n_{min} = \dfrac{4 \cdot m_w}{\pi \cdot d_v^2 \cdot \rho'' \cdot w_g}$.

Iš tikrųjų $n_{min} < n < n_{max}$.

C. Šilumos atidavimas esant burbuliniam virimui vertikaliuose vamzdžiuose.

Šis šilumos atidavimo būdas turi didelę praktinę vertę. Jis panaudojamas garo generatoriuose, garintuvuose ir pan. Fizikinis reiškinys apima kelias zonas. Pirmojoje zonoje skystis šyla ir pasienio sluoksnyje atsiranda burbuliukų. Antrojoje – dvifazio virimo zonoje burbuliukai kyla visoje skysčio erdvėje, pradeda rastis garų „kamščių". Trečiojoje zonoje garų purslai ir kamščiai susilieja į vieną didesnį garų srautą. Aprašytasis reiškinys tiriamas daugelyje darbų. Aptarsime svarbesnius atvejus.

1. V. Tolubinskio pasiūlyta lygtis, patikrinta garinant cukraus tirpalus:

$$Nu_v = 54 \cdot \frac{K^{0,6}}{Pr^{0,3}}. \qquad (12.137)$$

Virimo proceso Nuselto kriterijus Nu_v apskaičiuojamas pagal šią lygtį:

$$Nu_v = \frac{\alpha}{\lambda} \cdot \sqrt{\frac{\sigma}{\rho' \cdot g}}. \qquad (12.138)$$

Kriterijus K nustatomas iš lygties

$$K = \frac{q}{\rho'' \cdot r \cdot w}; \qquad (12.139)$$

čia q – šilumos srauto tankis, W/m^2; r – garavimo šiluma, J/kg; σ – skysčio paviršiaus įtempis, N/m; ρ' – skysčio tankis, kg/m^3; ρ'' – garų tankis, kg/m^3; w – virimo procese kylančių burbuliukų vidutinio skersmens ir jų kiekio, susidarančio per laiko vienetą, sandauga.

Dydis w, esant atmosferos slėgiui, lygus 0,078 m/s, o esant kitiems slėgiams apskaičiuojamas pagal lygtį

$$w = 0,078 \cdot \left(\frac{\rho_0''}{\rho''}\right)^{1,1}; \qquad (12.140)$$

čia ρ_o'' – garų tankis, kg/m^3, kai $p_o = 0,1$ MPa. Vandens garų $\rho_o'' = 0,579$ kg/m^3.

Ši lygtis tinka, kai įvairios koncentracijos tirpalai verda šilumokaityje, esant optimaliam jų lygiui. Jis apskaičiuojamas pagal šią empirinę lygtį:

$$\frac{H_{opt}}{H_v} = 0,26 + 0,0014 \cdot (\rho_t - \rho_v); \qquad (12.140a)$$

čia H_v – vamzdžių aukštis, m; ρ_l, ρ_v – tirpalo ir vandens tankiai, kg/m^3.

Optimalus tirpalo lygis užtikrina virimą visame vamzdelio aukštyje ir tuomet pasiekiamas maksimaliai galimas skysčio cirkuliacijos greitis.

2. Patikimesnė yra A. Ivaškevičiaus pasiūlyta lygtis:

$$Nu = 2 \cdot K_q^{0,35} \cdot \left(\frac{\rho'' / \rho'}{Ar} \right)^{0,175}; \qquad (12.141)$$

čia $Nu = \frac{\alpha \cdot d_v}{\lambda}$ – Nuselto kriterijus; K_q – virimo kriterijus:

$$K_q = \frac{q \cdot r \cdot \rho''}{g \cdot T_s \cdot \lambda} \cdot (\rho' - \rho''); \; Ar = \frac{g \cdot d_v^3}{\nu^2} \cdot \frac{\rho' - \rho''}{\rho'} - \text{Archimedo kriterijus.}$$

Ji sudaryta remiantis daugelio autorių duomenimis tam atvejui, kai naudojama daug skysčių. Rezultatų nesutapimas neviršija 25 %. Ši lygtis turi aiškią fizikinę prasmę – procese dalyvauja keliančiosios Archimedo jėgos.

3. N. Osiziko pasiūlyta lygtis sudaryta atsižvelgiant į tai, kad vamzdelyje virimo procese atsiranda dvifazis srautas, todėl yra svarbi fizikiniu požiūriu. Ji užrašoma taip:

$$Nu = 0,06 \cdot \left(\frac{\rho'}{\rho''} \right)^{0,28} \cdot \left(\frac{d_v \cdot m_f \cdot x}{\mu} \right)^{0,87} \cdot Pr^{0,4}; \qquad (12.142)$$

čia $Nu = \frac{\alpha \cdot d_v}{\lambda}$ – Nuselto kriterijus; $m_f = \frac{m}{f}$ – masės debito tankis, kg/(m^2·s):

$$m_f = \frac{m_k}{n_v \cdot \frac{\pi}{4} \cdot d_v^2} = \frac{m_k}{f};$$

čia m_k – koncentruoto tirpalo debitas aparate, kg/s; f – aparatą sudarančių vamzdelių skerspjūvio plotas, m^2; d_v – vamzdžio vidinis skersmuo, m; x – garų sausumo laipsnis:

$$x = \frac{W}{W + m_k} = \frac{W}{m_{pr}};$$

čia W – garų debitas aparate, kg/s; m_{pr} – pradinis skysčio debitas aparate, kg/s.

Visi termofizikiniai parametrai šiose lygtyse parenkami pagal sočiųjų garų temperatūrą.

D. Šilumos atidavimas esant priverstinei tirpalo cirkuliacijai virimo procese.

Esant priverstinei tirpalo cirkuliacijai (siurbliu), didėja šilumos srauto tankis q ir mažėja reikalingas aparato šildymo paviršius. Tokiu atveju šilumos atidavimo koeficientas apskaičiuojamas pagal priverstinio konvekcinio šilumos atidavimo, nesikeičiant fazinei būsenai, lygtį:

$$Nu = 0{,}023\, Re^{0{,}8} \cdot Pr^{0{,}43}. \qquad (12.143)$$

12.3.9. Šilumos atidavimas maišant skysčius maišikliais

Šiuo atveju fluido konvekcinis šilumos atidavimas gerokai didesnis.

Nustatant aparatų su gyvatukais ir apvalkalinio šildymo aparatų, kuriuose įrengti mentiniai ar propeleriniai maišikliai, šilumos atidavimo koeficientą, galima naudotis tokia lygtimi:

$$Nu = c \cdot Re_m^m \cdot Pr^{0{,}33} \cdot \left(\frac{\mu}{\mu_v}\right)^{0{,}14}; \qquad (12.144)$$

čia $Nu = \frac{\alpha \cdot D}{\lambda}$; $Re_m = \frac{\rho \cdot n \cdot d^2}{\mu}$; $Pr = \frac{\nu}{a}$; D – indo skersmuo, m; d – maišiklio mentės skersmuo, m; n – maišiklio sukimosi dažnis, 1/s; λ, ρ, μ, ν, a – maišomos medžiagos šiluminiai fizikiniai parametrai, nustatomi pagal vidutinę temperatūrą $t = 0{,}5 \cdot \left(t_p + \frac{t' + t''}{2}\right)$.

Koeficientai c ir m dažniausiai imami tokie: a) apvalkaliniams aparatams $c = 0{,}36$; $m = 0{,}67$, b) aparatams su gyvatukais $c = 0{,}87$; $m = 0{,}62$.

Ši lygtis tinka, kai $d = 0{,}6 \cdot D$ ir $D < 300$ mm.

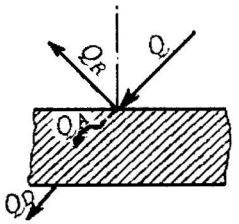
12.4. Šilumos pernaša spinduliuote

12.4.1. Sąvokos ir apibrėžimai

Visi kūnai sugeria ir spinduliuoja energiją. Spinduliuotės energijos nešikliai yra elektromagnetinės bangos arba energijos dalelių srautas, vadinamas energijos kvantais, arba fotonais. Tai išplaukia iš banginės ir korpuskulinės elektromagnetinių reiškinių prigimties.

Spinduliai, kurių bangos ilgis λ nuo 0,8 iki 40 μm ir kuriuos lemia spinduliuojančių kūnų temperatūra, vadinami infraraudonaisiais, arba šiluminiais, spinduliais. Jų sklidimo reiškinys vadinamas šilumine (termine) spinduliuote.

Kietieji ir skystieji kūnai spinduliuoja ir spindulius sugeria plonu paviršiniu sluoksniu. Dujos arba garai spinduliuoja visu savo tūriu.



12.19 pav. Į medžiagą krintančios spinduliuotės energijos pasiskirstymo schema

Jeigu į kūno paviršių krinta energijos srautas spinduliuote Q, tai tik jo dalį Q_A kūnas sugeria ir paverčia šilumine energija. Dalis spinduliuotės energijos srauto Q_R atspindima nuo kūno paviršiaus, o dalis Q_D pereina per kūną.

Akivaizdu, kad

$$Q_A + Q_R + Q_D = Q; \quad (12.145)$$

$$\frac{Q_A}{Q} + \frac{Q_R}{Q} + \frac{Q_D}{Q} = 1 \quad (12.146)$$

ir $$A + R + D = 1. \quad (12.147)$$

Dydžiai A, R, D apibūdina kūnų gebą šiluminius spindulius sugerti, atspindėti ir praleisti. A, R ir D tarpusavio santykiai gali būti įvairūs.

Jei $A = 1$ ($R = D = 0$), visa į kūną krintanti spindulinė energija sugeriama ir toks kūnas vadinamas absoliučiai juodu.

Jei $R = 1$ ($A = D = 0$), visa į kūną krintanti spindulinė energija atspindima. Toks kūnas vadinamas absoliučiai baltu.

Jei $D = 1$ ($A = R = 0$), visa į kūną krintanti spindulinė energija per jį pereina. Tai absoliučiai skaidrus kūnas.

Absoliučiai juodų, baltų ar skaidrių kūnų gamtoje nėra. Santykis tarp A, R ir D priklauso nuo kūno rūšies, jo temperatūros ir paviršiaus mikronelygumų (mikrogeometrinių savybių). Kieti ir skysti kūnai dažniausiai būna neskaidrūs. Jų $A + R + D = 1$ ir $D = 0$. Dujos, ypač viena- ir dviatomės, dažniausiai būna skaidrios, t. y. jų $D \approx 1$.

Apibrėžkime pagrindines kiekybines energijos sąvokas.

Suminis energijos srautas, visomis kryptimis spinduliuojantis nuo kūno, kurio paviršius F, visų ilgių λ bangomis (nuo 0 iki ∞), vadinamas pilnutiniu energijos srautu. Jis žymimas Q, W.

Pilnutinis energijos srautas, spinduliuojantis nuo kūno paviršiaus ploto vieneto, vadinamas spinduliuotės srauto tankiu. Jis žymimas E, W/m^2, ir apibrėžiamas taip:

$$E = \frac{Q}{F}. \quad (12.148)$$

Energijos srautas, spinduliuojantis nuo kūno paviršiaus ploto vieneto bangų ilgių intervale nuo λ iki $\lambda + d\lambda$, vadinamas *monochromatiniu spindu-*

liuotės srauto tankiu. Jis žymimas E_λ, priklauso nuo bangos ilgio ir kūno temperatūros, matuojamas W/(m^2·m) = W/m^3 ir apibrėžiamas lygtimi

$$I_\lambda = \frac{dE}{d\lambda} = \frac{dQ}{dF \cdot d\lambda}. \qquad (12.149)$$

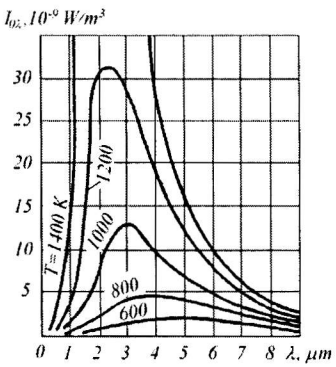
12.4.2. Pagrindiniai spinduliuotės dėsniai

M. Plankas suformulavo absoliučiai juodo kūno monochromatinės spinduliuotės srauto tankio dėsnį, kuris aprašomas tokia lygtimi:

$$I_{o\lambda} = \frac{C_1 \cdot \lambda^{-5}}{e^{\frac{C_2}{\lambda \cdot T}} - 1}; \qquad (12.150)$$

čia C_1 ir C_2 – Planko spinduliuotės pastoviosios: $C_1 = 3{,}74 \cdot 10^{-16}$ W/m^2; $C_2 = 1{,}4388 \cdot 10^{-2}$ m·K; T – temperatūra, K; λ – bangos ilgis, m.

Grafinis šios lygties vaizdas pateiktas 12.20 paveiksle.



12.20 pav. Planko dėsnio grafinis vaizdavimas

Šią lygtį suintegravo Bolcmanas, o eksperimentiškai ją patvirtino Stefanas. Jie gavo absoliučiai juodo kūno spinduliuotės srauto tankį:

$$E_o = \int_{\lambda=0}^{\infty} I_{o\lambda} \cdot d\lambda = \sigma_o \cdot T^4.$$

Absoliučiai juodo kūno spinduliuotės konstanta $\sigma_o = 5{,}67 \cdot 10^{-8}$ W/(m^2·K^4). Ši lygtis vadinama Stefano ir Bolcmano dėsniu ir praktinių skaičiavimų patogumui užrašoma taip:

$$E_o = C_o \cdot \left(\frac{T}{100}\right)^4; \qquad (12.151)$$

čia C_o – absoliučiai juodo kūno spinduliuotės pastovioji: $C_o = \sigma_o \cdot 10^8 = 5{,}67$ W/(m^2·K).

Realiems ar pilkiems kūnams irgi tinka Stefano ir Bolcmano dėsnis, bet jų spinduliuotės pastoviosios vertė mažesnė. Santykis $\varepsilon = \frac{C}{C_o} < 1$ vadinamas pilko kūno juodumo laipsniu. Jis priklauso nuo medžiagos cheminės kilmės,

jos paviršiaus mikrogeometrijos ir nustatomas bandymais. Poliruotam variui $\varepsilon = 0{,}023$, oksiduotai geležiai $\varepsilon = 0{,}736$, poliruotam aliuminiui $\varepsilon = 0{,}04$, keraminėms plytoms $\varepsilon = 0{,}93$, tekintajam ketui $\varepsilon = 0{,}435$, asbestiniam kartonui $\varepsilon = 0{,}96$. Taigi pilko kūno spinduliuotės srauto tankis

$$E = C \cdot \left(\frac{T}{100}\right)^4 = \varepsilon \cdot C_o \cdot \left(\frac{T}{100}\right)^4 = \varepsilon \cdot E_o . \qquad (12.152)$$

Kirchhofas išnagrinėjo energijos pernašos tarp absoliučiai juodo ir pilko kūnų procesą ir parodė, kaip nustatyti kūnų juodumo laipsnį ε.

Tarkim, kūnų paviršiai yra lygiagretūs ir taip arti vienas kito, kad vieno kūno spinduliuotė visa patenka į kitą kūną. Absoliučiai juodo kūno temperatūra T_o, spinduliuotės srauto tankis E_o, spindulių sugėrimo koeficientas A_o. Pilko kūno – atitinkamai: T, E, A. Be to, tarkim, kad $T > T_o$.

Pilko kūno spinduliuojama energija E patenka į absoliučiai juodą kūną ir yra visiškai jo sugeriama. Absoliučiai juodo kūno spinduliuotė patenka į pilką kūną: dalį $E_o \cdot A$ sugeria, dalį $E_o \cdot (1-A)$ atspindi į absoliučiai juodą kūną, kuris ją visiškai sugeria.

Taigi spinduliuotės pernašos procese energijos balansas užrašomas taip:

$$q = E + E_o \cdot (1-A) - E_o. \qquad (12.153)$$

Jei spinduliuotės pernašos procese kūnų temperatūros (T_o ir T) vienodos, tai $q = 0$ (dinaminė pusiausvyra) ir $E - A \cdot E_o = 0$. Todėl $A = \dfrac{E}{E_o} = \varepsilon$.

Matome, kad kūno juodumo laipsnis lygus jo sugėrimo koeficientui. Tai labai svarbu eksperimentiškai nustatant kūnų juodumo laipsnius ir tuo pagrindu skaičiuojant šilumos pernašą spinduliuote tarp kūnų.

Kiekvienas spinduliuojantis kūnas spinduliuotę skleidžia visomis kryptimis ir jos srauto tankis lygus $E = \varepsilon \cdot C_o \left(\dfrac{T}{100}\right)^4$. Jis pasiskirsto priklausomai nuo kampo tarp spinduliuojančio kūno ir apšvitinamo kūno normalių. Nesunku įrodyti, kad normalės kryptimi spinduliuotės srauto tankis esti didžiausias ir lygus

$$E_n = \frac{E}{\pi} = \frac{\varepsilon}{\pi} \cdot C_o \left(\frac{T}{100}\right)^4 . \qquad (12.154)$$

Tuomet pagal Lamberto dėsnį šiluminės energijos kiekis, spinduliuojamas nuo paviršiaus ploto dF_1 paviršiaus dF_2 kryptimi, proporcingas energijos kiekiui, kuris spinduliuojamas normalės kryptimi, padaugintam iš erdvinio

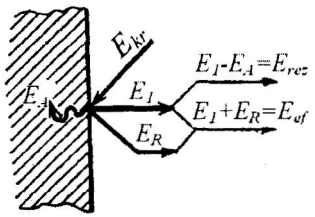
kampo $d\Omega$, kuriuo iš dF_1 matomas dF_2, ir iš sklidimo krypties su paviršiaus normale kampo $\cos\varphi$. Gauname:

$$dQ_\varphi = \frac{\varepsilon}{\pi} \cdot C_o \cdot \left(\frac{T}{100}\right)^4 \cdot dF_1 \cdot d\Omega \cdot \cos\varphi . \qquad (12.155)$$

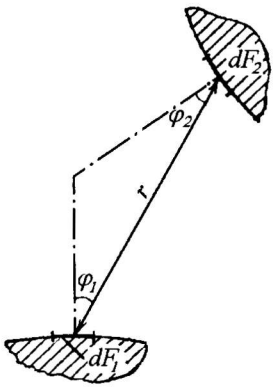
Lamberto dėsnis nusako spinduliuotės srauto priklausomybę nuo spinduliuotės kampo φ. Pagal šį dėsnį vyksta šilumos pernaša spinduliuote tarp atskirų kūnų.

12.4.3. Kietų kūnų tarpusavio spinduliuotė

Dažniausiai kūną supa kiti kūnai. Jie visi išspinduliuoja tam tikrą energijos kiekį, išreiškiamą Stefano ir Bolcmano dėsniu. Šią vienų kūnų išspinduliuotą energiją kiti kūnai iš dalies sugeria, o iš dalies atspindi, nes dauguma kietųjų kūnų nepraleidžia šiluminės spinduliuotės. Taigi nuo kieto paviršiaus sklindantis spindulių srautas susideda iš vadinamųjų savų ir atspindėtų spindulių (12.21 pav.). Šis bendras spindulių srautas vadinamas efektyviąja kūno spinduliuote. Skaičiuojant šilumos pernašą spinduliuote, dažnai vartojama kūno rezultatyviosios, arba atstojamosios, spinduliuotės sąvoka. Tai paties kūno išspinduliuotos ir jo sugertos energijų skirtumas.



12.21 pav. Rezultatyviosios ir efektyviosios spinduliuotės srautai



2.22 pav. Spinduliuojančiųjų paviršių elementų tarpusavio padėtis erdvėje

Jei šilumine spinduliuote besikeičiantys paviršiai vienas kito atžvilgiu išdėstyti laisvai, šilumos pernašą tarp jų apskaičiuoti labai sunku. Pavaizduokime du absoliučiai juodų paviršių elementus dF_1 ir dF_2 (12.22 pav.). Jų temperatūros atitinkamai yra T_1 ir T_2.

Pagal Lamberto dėsnį spinduliuotės srautas nuo elemento dF_1 elemento dF_2 kryptimi

$$dQ_1 = \frac{1}{\pi} \cdot E_1 \cdot \cos\varphi_1 \cdot d\Omega_1 \cdot dF_1 ; \qquad (12.156)$$

čia $d\Omega_1$ – erdvinis kampas, kuriuo iš dF_1 matyti dF_2 paviršius, t. y.

$$d\Omega_1 = \frac{dF_2}{r^2} \cdot \cos\varphi_2 .$$

Tuomet

$$dQ_1 = \frac{1}{\pi} \cdot E_1 \cdot \frac{\cos\varphi_1 \cdot \cos\varphi_2}{r^2} \cdot dF_1 \cdot dF_2 . \qquad (12.157)$$

Antrojo kūno elemento dF_2 sugeriama šiluma

$$dQ_{12} = A_2 \cdot dQ_1 = \frac{1}{\pi} \cdot A_2 \cdot E_1 \frac{\cos\varphi_1 \cdot \cos\varphi_2}{r^2} \cdot dF_1 \cdot dF_2 . \qquad (12.158)$$

Analogiškai energija, skindanti nuo dF_2 į dF_1 ir jo visiškai sugeriama, bus

$$dQ_{21} = \frac{1}{\pi} \cdot E_2 \cdot \frac{\cos\varphi_1 \cdot \cos\varphi_2}{r^2} \cdot dF_1 \cdot dF_2 . \qquad (12.159)$$

Šilumą pernešant dalyvauja srautas, kurį sudaro šių energijos srautų skirtumas:

$$Q = \left(A_2 \cdot E_1 - A_1 \cdot E_2\right) \int_{F_1} \int_{F_2} \cdot \frac{\cos\varphi_1 \cdot \cos\varphi_2}{\pi \cdot r^2} \cdot dF_1 \cdot dF_2 . \qquad (12.160)$$

Dvilypis integralas užrašomas taip:

$$\int_{F_1} \int_{F_2} \cdot \frac{\cos\varphi_1 \cdot \cos\varphi_2}{\pi \cdot r^2} \cdot dF_1 \cdot dF_2 = F_1 \cdot \varphi_{12} = F_2 \cdot \varphi_{21} ; \qquad (12.161)$$

čia φ_{12} ir φ_{21} – krypties koeficientai (kampiniai arba konfigūracijos koeficientai). Tai grynai geometriniai parametrai, priklausantys nuo abiejų paviršių išsidėstymo, jų dydžio ir atstumo tarp jų.

Kadangi $E_1 = \varepsilon_1 \cdot C_o \cdot \left(\frac{T_1}{100}\right)^4$, $E_2 = \varepsilon_2 \cdot C_o \cdot \left(\frac{T_2}{100}\right)^4$, o pilkų kūnų $\varepsilon_1 = A_1$, $\varepsilon_2 = A_2$, tai šias vertes įrašę į (12.160) lygtį ir pertvarkę, gauname:

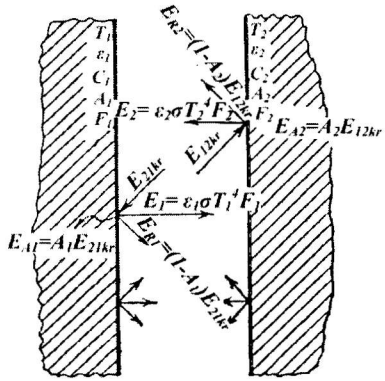
$$Q = \varphi_{12} \cdot F_1 \cdot \varepsilon_s \left[\left(\frac{T_1}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_2}{100}\right)^4\right]; \qquad (12.162)$$

čia ε_s – dviejų kūnų sistemos juodumo laipsnis, bendruoju atveju išreiškiamas lygtimi

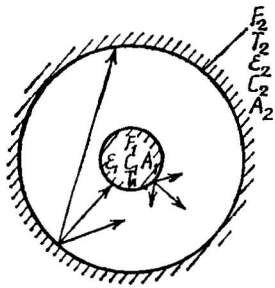
$$\varepsilon_s = \frac{1}{1 + \left(\frac{1}{\varepsilon_1} - 1\right) \cdot \varphi_{12} + \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1\right) \cdot \varphi_{21}} . \qquad (12.163)$$

φ_{12} ir φ_{21} kampinius koeficientus nustatyti yra nelengva. Šiame procese naudojami įvairūs matematiniai, grafoanalitiniai ir panašūs metodai.

Iš tikrųjų šiluma dažniausiai pernešama spinduliuote tarp dviejų plokščių ir lygiagrečių paviršių (12.23 pav.).



12.23 pav. Lygiagrečių paviršių spinduliuotė



12.24 pav. Bendraašių cilindrų spinduliuotė

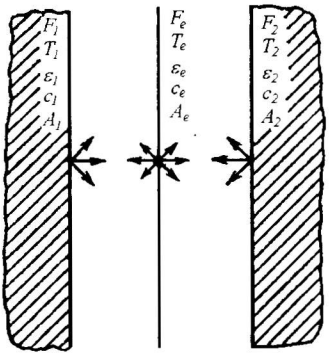
Šiuo atveju $F_1 = F_2 = F$; $\varphi_{12} = \varphi_{21} = 1$. Tada

$$\varepsilon_s = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} . \qquad (12.163a)$$

Jei turime bendraašius cilindrus (12.24 pav.), tai visi pirmojo paviršiaus spinduliai patenka į antrąjį paviršių, todėl $\varphi_{12} = 1$, o antrojo paviršiaus ne visi spinduliai patenka į pirmąjį paviršių, todėl jo $\varphi_{21} < 1$. Tačiau $F_1 \cdot \varphi_{12} = F_2 \cdot \varphi_{21}$, todėl $\varphi_{21} = \frac{F_1}{F_2}$, nes $\varphi_{12} = 1$. Tada

$$\varepsilon_s = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{F_1}{F_2} \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1\right)} . \qquad (12.163b)$$

(12.163a) lygtis patogi spinduliuotės ekranų analizei. Ekranai skirti šilumos srautams tarp paviršių mažinti ir apsaugai nuo žalingos intensyviai spinduliuojančio paviršiaus įtakos (12.25 pav.).



12.25 pav. Paviršių ekranavimas

Nesunku įrodyti, jog įtaisius vieną ekraną spinduliuojančio kūno srauto tankis sumažėja:

$$\frac{E_e}{E_{12}} = \frac{Q_e}{Q_{12}} = \frac{\dfrac{1}{\varepsilon_1} + \dfrac{1}{\varepsilon_2} - 1}{\dfrac{1}{\varepsilon_1} + \dfrac{1}{\varepsilon_2} + \dfrac{2}{\varepsilon_e} - 2} < 1 \,. \qquad (12.164)$$

Atskiru atveju, kai $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon_e$ (visos medžiagos vienodos), esant vienam ekranui, gauname:

$$\frac{Q_e}{Q_{12}} = \frac{1}{2} \,. \qquad (12.164a)$$

T. y. dėl ekrano poveikio spinduliuotės galia sumažėjo perpus. Panaudojus n ekranų, pasiekiamas toks efektas:

$$\frac{Q_e}{Q_{12}} = \frac{\dfrac{1}{\varepsilon_1} + \dfrac{1}{\varepsilon_2} - 1}{\dfrac{1}{\varepsilon_1} + \dfrac{1}{\varepsilon_2} - 1 + \sum_1^n \dfrac{2}{\varepsilon_{ei}} - n} \,. \qquad (12.165)$$

Kai visi ekranai vienodi, tai $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon_{ni}$, gauname:

$$\frac{Q_e}{Q_{12}} = \frac{1}{n+1} \,. \qquad (12.166)$$

Akivaizdu, jog ekranavimas yra efektyvus šilumos izoliavimo būdas. Tarkim, šiluma pernešama tarp vienas kitą gaubiančių kūnų (spinduliuoja patalpoje esantys įrenginiai, paviršiai). Šiuo atveju $\varphi_{12} = 1$.

Kadangi $\varphi_{12} \cdot F_1 = \varphi_{21} \cdot F_2$, todėl $\varphi_{21} = \dfrac{F_1}{F_2}$. (12.167)

Tokiu atveju suminis dviejų kūnų sistemos juodumo laipsnis

$$\varepsilon_s = \frac{1}{\dfrac{1}{\varepsilon_1} + \dfrac{F_1}{F_2}\left(\dfrac{1}{\varepsilon_2} - 1\right)} \text{ ir, jei } \frac{F_1}{F_2} << 1, \text{ tai } \varepsilon_s = \varepsilon_1 . \quad (12.168)$$

Tuomet šilumos pernaša tarp šių kūnų

$$Q_{12} = \varepsilon_s \cdot C_o \cdot F_1 \left[\left(\frac{T_1}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_2}{100}\right)^4\right]. \quad (12.169)$$

12.4.4. Liepsnos spinduliuotė. Radiacinės spinduliuotės degimo kamerose ypatumai

Garo generatorių, šildymo prietaisų, dujų turbinų, raketinių variklių kūryklose, degant kurui, susidaro liepsnos fakelas ir karštų dūmų srautas, nuo kurių šiluma spinduliuote sklinda į šaltesnes degimo kameros sienas, į šilumos perdavimo paviršius (kūryklų ekranus), esančius prie degimo kamerų sienų.

Apskaičiuoti radiacinės šilumos pernašą kūryklose ypač sunku, nes čia degimo ir šilumos pernašos procesai vyksta sudėtingomis fizikinėmis sąlygomis. Taip yra todėl, kad, degant kurui, temperatūra kameroje pasiskirsto netolygiai, degimo produktų spindulių sugėrimo charakteristikos yra gana neapibrėžtos, šildomų paviršių temperatūra taip pat neapibrėžta, kadangi jie būna padengti oksidų, dulkių, suodžių, šlakų sluoksniu. Šių reiškinių visuma daro dūmų ir fakelo spinduliuotės charakteristikas ypač sudėtingas, nepriklausančias nuo degimo proceso sąlygų.

Liepsnos fakelo pavidalas priklauso nuo to, kokiais būdais sumaišomas kuras ir degimui reikalingas oras.

Nešviečiančioji liepsna susidaro degant dujoms, kai dujos ir oksidatorius (oro deguonis) gerai susimaišo. Tokios liepsnos ir užgesusių degimo produktų spinduliuotė priklauso tik nuo dūmuose esančių anglies dvideginio ir vandens garų (CO_2 ir H_2O) spinduliuotės. Simetriniai dujų komponentai – N_2 ir O_2 spinduliavimo požiūriu yra skaidrūs.

Šviečiančioji liepsna gaunama degant iš anksto neišgarintam skystam angliavandenilių kurui: mazutui, žibalui. Tokioje liepsnoje kartu su triatomė-

mis dujomis (CO_2, H_2O) spinduliuoja suodžių dalelės. Jos susidaro degimo pradžioje, kurui skylant termiškai, ir nedega iki fakelo pabaigos.

Pusiau šviečianti liepsna gaunama degant kietam dulkių pavidalo kurui. Tokiu atveju liepsnoje būna kokso ir pelenų gabaliukų, o kai kada spinduliuoja ir suodžiai.

Inžinerinėje degimo kamerų spinduliuotės skaičiavimų praktikoje taikomi du metodai: 1) kai spinduliuotės srautas nustatomas remiantis Stefano ir Bolcmano lygtimi, 2) kai pasiremiama panašumo teorijos metodais ir šilumos pernaša spinduliuote aprašoma pusiau empirine kriterine lygtimi.

Trumpai aptarkime abu metodus.

Taikant *pirmąjį metodą*, šilumos pernaša tarp fakelo ir kūryklos (degimo kameros) paviršių aprašoma Stefano ir Bolcmano lygtimi:

$$Q_r = \sigma_o \cdot \varepsilon_k \cdot F(T_f^4 - T_p^4); \qquad (12.170)$$

čia $\sigma_o = C_o \cdot 10^{-8} = 5{,}67 \cdot 10^{-8}$, W/(m^2·K^4); F – kai degimo kameros (kūryklos) sienos padengtos šilumą sugeriančiais paviršiais (ekranais), – tų paviršių plotas, m^2. Šis dydis apskaičiuojamas turint kūryklos konstrukcinius duomenis apie joje išdėstytus ekranų paviršius; T_p – į liepsną nukreipto ekrano paviršiaus temperatūra. Paviršius būna užterštas ir dėl to T_p nėra griežtai apibrėžtas dydis. Dažnai vamzdžio ir teršalų terminis pasipriešinimas nevertinamas ir laikoma, kad $T_p = T_s$ (skysčio, esančio ekranuose, temperatūra); T_f – efektyvioji kūryklos aplinkos temperatūra: $T_f = (1{,}02...1{,}25) \cdot T''_k$. Ji priklauso nuo kuro rūšies ir degimo sąlygų. Dažniausiai T_f imama kaip T''_k ir T_{ad} geometrinis vidurkis; T_{ad} – adiabatinė kuro degimo temperatūra, apskaičiuojama sudarius kuro degimo balansą, kai kuras visiškai sudega be energijos nuostolių, esant realiam oro pertekliui; T''_k – iš kūryklos ištekančių dujų absoliučioji temperatūra. Dažniausiai tai būna ieškomasis dydis skaičiuojant šilumos pernašą spinduliuote kūrykloje; ε_k – fakelo ir šilumą priimančio paviršiaus sistemos juodumo laipsnis. Jis randamas žinant paviršių ir fakelo juodumo laipsnius:

$$\varepsilon_k = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_f} + \frac{1}{\varepsilon_p} - 1} = \frac{\varepsilon_f \cdot \varepsilon_p}{\varepsilon_p + \varepsilon_f - \varepsilon_p \cdot \varepsilon_f}. \qquad (12.171)$$

Kai ekranai yra metaliniai vamzdžiai, galima imti $\varepsilon_p = 0{,}82$.

Fakelo juodumo laipsniui ε_f apskaičiuoti Mitoras, Gurvičius, Blochas panaudojo Buferio dėsnį. Pagal jį ε_f dydis priklauso nuo spindulio kelio ilgio kūryklos aplinkoje koeficiento:

$$\varepsilon_f = 1 - \exp(-K \cdot p \cdot l_{ef});$$

čia l_{ef} – efektyvusis dujų spindulio kelias, m.

Kai fakelo liepsna spinduliuoja į kūrykloje išdėstytus ekranus, l_{ef} apskaičiuojamas pagal šią lygtį:

$$l_{ef} \cong 0,9 \cdot \frac{4 \cdot V_k}{F_{ks}}; \qquad (12.172)$$

čia V_k – kūryklos kameros tūris, m^3; F_{ks} – kūryklą gaubiančių sienų plotas (šlapio paviršiaus plotas).

Kai spinduliuojančios dujos teka tarpvamzdinėje erdvėje, kuri yra sudaryta iš vamzdžių pluoštų,

a) $l_{ef} = \left(1,87 \cdot \frac{s_1 + s_2}{d_i} - 4,1 \right) \cdot d_i$, kai $\frac{s_1 + s_2}{d_i} \le 7$,

b) $l_{ef} = \left(2,82 \cdot \frac{s_1 + s_2}{d_i} - 10,6 \right) \cdot d_i$, kai $7 < \frac{s_1 + s_2}{d_i} \le 13$;

čia p – slėgis kūrykloje, bar; K – spindulio susilpnėjimo kūryklos erdvėje koeficientas.

Nešviečiančiam fakelui (nešviečiančiai liepsnai) šis koeficientas apskaičiuojamas pagal lygtį

$$K = K_d = \left(\frac{0,78 + 1,6 \cdot r_{H_2O}}{\sqrt{p_{ss} \cdot l_{ef}}} - 0,1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{T_k''}{1000} \right) \cdot r_{ss}; \qquad (12.173)$$

čia T_k'' – absoliučioji dūmų temperatūra kūryklos gale; r_{ss} – suminė spinduliuojančių (triatomių) dujų tūrio dalis dūmuose; $r_{ss} = r_{H_2O} + r_{CO_2}$; p_{ss} – suminis spinduliuojančių (triatomių) dujų dalinis slėgis, bar; $p_{ss} = p \cdot r_{ss}$; r_{H_2O}, r_{CO_2} – H_2O ir CO_2 dujų tūrio dalys dūmuose.

Šviečiančio fakelo spindulio susilpnėjimo kūryklos aplinkoje koeficientas įvertina dūmuose esančias suodžių daleles. Tuomet

$$K = K_d + K_s; \qquad (12.174)$$

čia K_d – nešviečiančio fakelo spindulio susilpnėjimo koeficientas; K_s – spindulių susilpnėjimo dėl suodžių koeficientas. Jis apskaičiuojamas pagal šią empirinę lygtį:

$$K_s = 0,03 \cdot (2 - \alpha_k) \cdot \left(1,6 \cdot \frac{T_k''}{1000} - 0,5 \right) \cdot \frac{C^n}{H^n}; \qquad (12.175)$$

čia α_k – oro pertekliaus kūrykloje koeficientas; C^n, H^n – anglies ir vandenilio kiekiai naudojamojoje kuro masėje.

Dulkėtoje, pusiau šviečiančioje aplinkoje spindulių susilpnėjimas dėl pelenų ir kokso dalelių

$$K_{pš} = K_d + K_p + K_k; \qquad (12.176)$$

čia K_d – nešviečiančio fakelo susilpnėjimo koeficientas, aptartas anksčiau; K_p – spindulių susilpnėjimas dėl pelenų dalelių. Jis apskaičiuojamas pagal tokią pusiau empirinę lygtį:

$$K_p = 4300 \cdot \frac{\rho_d \cdot \mu_p}{\sqrt[3]{T_k'' \cdot d_p^2}}; \qquad (12.176a)$$

čia ρ_d – dūmų tankis, kg/m^3; μ_p – pelenų dalelių koncentracija, kg/m^3; d_p – pelenų dalelių skersmuo, (20...30)·10^{-6} m.

K_k – spindulio susilpnėjimas dėl dūmuose esančių kokso dalelių. Priklausomai nuo kuro rūšies ir jo sudeginimo būdo $K_k = 0,02...0,10$.

Spinduliuotės kūrykloje skaičiavimas *antruoju metodu* remiasi pusiau empirine panašumo kriterijų lygtimi.

Panašumo lygtis radiacinės šilumos pernašai apskaičiuoti susieja bedimensę dūmų temperatūrą už kūryklos $\theta_k'' = \frac{T_k''}{T_{ad}}$ su tam tikrais kriterijais: Bolcmano kriterijumi (*Bo*), kūryklos juodumo laipsniu ε_k ir parametru *M*, priklausančiu nuo temperatūros pasiskirstymo kūryklos ilgyje ($M \approx 0,5$). Lygtis turi tokį pavidalą:

$$\theta_k'' = \frac{Bo^{0,6}}{M \cdot \varepsilon_k^{0,6} + Bo^{0,6}}. \qquad (12.177)$$

Bolcmano kriterijus *Bo* išreiškia kuro degimo produktų teorinį entalpijos santykį su maksimaliu fakelo spinduliuotės srauto tankiu:

$$Bo = \frac{V \cdot C_p^v}{\sigma_o \cdot \psi \cdot F_k \cdot T_{ad}^3}; \qquad (12.178)$$

čia V – kūryklos tūris, m^3; C_p^v – vidutinė tūrinė savitoji šiluma, esant pastoviam slėgiui, J/(m^3·K); $V \cdot C_p^v$ – vidutinė degimo produktų šiluminė talpa; $\psi = 0,1...0,65$ – šilumą sugeriančių paviršių (kūryklos ekranų) šiluminio efektyvumo koeficientas, įvertinantis jų konstrukciją ir užterštumą; F_k – kūryklos kameros sienų plotas, m^2; T_{ad} – adiabatinė kuro degimo temperatūra; $\sigma_o = 5,67 \cdot 10^{-8}$ W/(m^2·K^4).

Kūryklos juodumo laipsnis ε_k yra susijęs su fakelo juodumo laipsniu ε_f:

$$\varepsilon_k = \frac{\varepsilon_f}{\varepsilon_f + \psi \cdot (1 - \varepsilon_f)}.$$

Kadangi skaičiuojant abiem metodais dalis pradinių duomenų priklauso nuo T_k'', tai skaičiuojama nuoseklaus priartėjimo metodu. Be to, skaičiuojant šilumos pernašą kūrykloje, lyginamos šilumos pernašos ir kūryklos šilumos balanso lygtys.

12.4.5. Šilumos atidavimas spinduliuote

Cheminėje technologijoje neretai susiduriama su sudėtingais šilumos pernašos procesais, kai šiluma tuo pačiu metu pernešama spinduliuote ir konvekcija. Tokiais atvejais patogu naudoti šią šilumos atidavimo spinduliuote koeficiento išraišką:

$$\alpha_{sp} = \frac{Q}{(t_f - t_p)} = \frac{\sigma_o \cdot \varepsilon_k \cdot F \cdot (T_f^4 - T_p^4)}{(T_f - T_p) \cdot F}, \qquad (12.179)$$

arba $$\alpha_{sp} = \frac{\sigma_o \cdot \varepsilon_k \cdot (T_f^4 - T_P^4)}{(T_f - T_P)}. \qquad (12.180)$$

Suminis karšto dujų srauto šilumos atidavimo sienelėms koeficientas išreiškiamas taip:

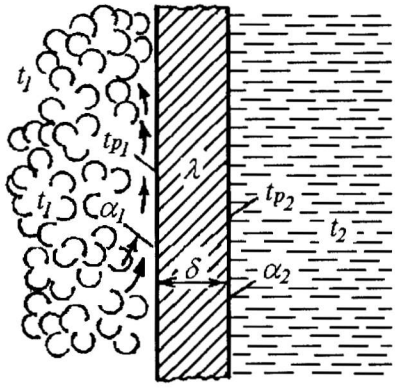
$$\alpha = \alpha_k + \alpha_{sp};$$

čia α – suminis šilumos atidavimo koeficientas; α_k – konvekcinio šilumos atidavimo koeficientas; α_{sp} – šilumos atidavimo spinduliuote koeficientas.

12.5. Nuostovusis šilumos perdavimas

12.5.1. Šilumos perdavimas per plokščią sienelę

Panagrinėkime šilumos perdavimą per plokščią sienelę, kurios aukštis ir plotis neriboti. Tarkim, ji skiria dvi skirtingų temperatūrų t_1 ir t_2 medžiagas (fluidus) ir $t_1 > t_2$ (12.26 pav.). Tuomet nuo t_1 iki t_{p1} šiluma yra atiduodama, nuo t_{p1} iki t_{p2} per sienelę perduodama laidumu, o nuo t_{p2} iki t_2 – vėl atiduodama. Visas šis suminis šilumos pernašos nuo vieno fluido (aplinkos) kitam procesas vadinamas *šilumos perdavimu.* Nustatykime šilumos srauto tankį $q = \frac{Q}{F}$ ir sienelių paviršių temperatūras nuostoviosiomis šilumos pernašos sąlygomis.



12.26 pav. Šilumos perdavimas per sienelę

Atskiri šilumos pernašos procesai aprašomi taip:

- šilumos atidavimas nuo t_1 iki t_{p_1} – lygtimi

$$q = \alpha_1 \cdot (t_1 - t_{p_1});$$

- šilumos laidumas per sienelę nuo t_{p_1} iki t_{p_2} – lygtimi

$$q = \frac{\lambda}{\delta} \cdot (t_{p_1} - t_{p_2});$$

- šilumos atidavimas nuo t_{p_2} iki t_2 – lygtimi

$$q = \alpha_2 \cdot (t_{p_2} - t_2).$$

Šias lygtis išsprendžiame temperatūrų skirtumų atžvilgiu:

$$(t_1 - t_{p_1}) = q \cdot \left(\frac{1}{\alpha_1}\right);$$

$$(t_{p_1} - t_{p_2}) = q \cdot \left(\frac{\delta}{\lambda}\right);$$

$$(t_{p_2} - t_2) = q \cdot \left(\frac{1}{\alpha_2}\right).$$

Nuostoviajame šilumos pernašos procese $q = const$. Sudėję šias lygtis, gauname:

$$t_1 - t_2 = q \cdot \left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}\right);$$

čia $q = \dfrac{t_1 - t_2}{\dfrac{1}{\alpha_1} + \dfrac{\delta}{\lambda} + \dfrac{1}{\alpha_2}}$.

Pažymime:

$$\frac{1}{\dfrac{1}{\alpha_1} + \dfrac{\delta}{\lambda} + \dfrac{1}{\alpha_2}} = k.$$

Tuomet

$$q = k \cdot (t_1 - t_2). \tag{12.181}$$

Dydis k vadinamas šilumos perdavimo koeficientu. Tai šilumos kiekis, perduodamas per 1 s per 1 m^2 sienelės paviršiaus ploto, kai fluidų temperatūrų skirtumas lygus 1 K (vienam laipsniui):

$$[k] = \left[\frac{q}{\Delta t}\right] = \left[\frac{W}{m^2 \cdot K}\right].$$

Šilumos srautas per fluidus skiriančią sienelę

$$Q = q \cdot F = k \cdot F \cdot (t_1 - t_2); \tag{12.182}$$

čia F – šilumą perduodantis plokščios sienelės plotas.

Dydis, atvirkščias šilumos perdavimo koeficientui, vadinamas pilnutiniu šiluminiu pasipriešinimu, arba *šilumine varža*, ir žymimas R_t:

$$R_t = \frac{1}{k} = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}. \tag{12.183}$$

Pilnutinė sienelės šiluminė varža lygi dalinių šiluminių varžų sumai.

Analogiškai samprotaudami, gausime tokią daugiasluoksnės plokščios sienelės, skiriančios dvi skirtingų temperatūrų aplinkas, šilumos perdavimo koeficiento išraišką:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum_{i=1}^{n}\left(\frac{\delta_i}{\lambda_i}\right) + \frac{1}{\alpha_2}}. \tag{12.184}$$

Atskirų sluoksnių ribinės temperatūros apskaičiuojamos pagal šias lygtis:

- *1*-ojo sluoksnio paviršiaus temperatūra iš karštos aplinkos pusės:

$$t_{p_1} = t_1 - q \cdot \left(\frac{1}{\alpha_1}\right); \tag{12.184a}$$

- *1*-ojo ir *2*-ojo sluoksnių lietimosi ribos temperatūra

$$t_{p_2} = t_{p_1} - q \cdot \left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_1}{\lambda_1}\right); \tag{12.184b}$$

- *1*-ojo ir $(i + 1)$ sluoksnių lietimosi ribos temperatūra

$$t_{p,i} = t_{p_1} - q \cdot \left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \ldots + \frac{\delta_i}{\lambda_i}\right); \tag{12.184c}$$

- sienelės paviršiaus temperatūra iš vėsesnės aplinkos (t_2 temperatūros fluido) pusės:

$$t_{p,i+1} = t_{p_1} - q \cdot \left(\frac{1}{\alpha_1} + \sum_{i=1}^{n} \left(\frac{\delta_i}{\lambda_i} \right) \right) = t_{p_2} + q \cdot \left(\frac{1}{\alpha_2} \right). \qquad (12.184d)$$

Pilnutinė šiluminė sienelės varža

$$R = \frac{1}{k} = \frac{1}{\alpha_1} + \sum_{i=1}^{n} \left(\frac{\delta_i}{\lambda_i} \right) + \frac{1}{\alpha_2}. \qquad (12.185)$$

Tuo atveju, kai sienelė iš abiejų pusių padengta suodžiais, dulkėmis, nuoviromis ir tų dangų šiluminė varža gali būti nustatyta, tai

$$R = \frac{1}{\alpha_1} + R_{u_1} + \sum_{i=1}^{n} \left(\frac{\delta_i}{\lambda_i} \right) + R_{u_2} + \frac{1}{\alpha_2}. \qquad (12.186)$$

Šilumos perdavimo koeficiento išraiška atitinkamai bus

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + R_{u_1} + \sum_{i=1}^{n} \left(\frac{\delta_i}{\lambda_i} \right) + R_{u_2} + \frac{1}{\alpha_2}}. \qquad (12.187)$$

Dangų šiluminių varžų dydžiai R_u (ar $\frac{1}{R_u}$) parenkami žinynuose, tačiau apytiksliuose skaičiavimuose dangų šiluminė varža nevertinama.

12.5.2. Šilumos perdavimas per cilindrinę sienelę

Tarkim, per neriboto ilgio cilindrinę vienalytę sienelę (vamzdį) nuostoviuoju režimu šilumos srautas sklinda nuo viduje tekančio temperatūros t_1 fluido į išorę, kur fluido temperatūra t_2. Laikydami, kad $t_1 > t_2$, apskaičiuosime šilumos srauto tankį vamzdžio ilgio vienetui ($q_l = Q/l$) ir sienelės paviršių temperatūras. Kaip ir tirdami plokščią sienelę, rašome tris lygtis:

$$q_l = \alpha_1 \cdot \pi \cdot d_1 \cdot (t_1 - t_{p_1});$$

$$q_l = \frac{t_{p_1} - t_{p_2}}{\frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \lambda} \cdot ln\left(\frac{d_2}{d_1} \right)};$$

$$q_l = \alpha_2 \cdot \pi \cdot d_2 \cdot (t_{p_2} - t_2).$$

Išsprendę šias lygtis temperatūrų skirtumo atžvilgiu ir susumavę, kadangi $q_l = const$, gausime:

$$q_l = \frac{\pi(t_1 - t_2)}{\frac{1}{\alpha_1 \cdot d_1} + \frac{1}{2 \cdot \lambda} \cdot ln\left(\frac{d_2}{d_1}\right) + \frac{1}{\alpha_2 \cdot d_2}}.$$

Pažymėję $k_c = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1 \cdot d_1} + \frac{1}{2 \cdot \lambda} \cdot ln\frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\alpha_2 \cdot d_2}}$, (12.188)

gauname $Q = q_l \cdot l = k_c \cdot \pi \cdot l \cdot (t_1 - t_2)$; (12.189)

čia k_c – cilindrinės sienelės šilumos perdavimo vamzdžiui koeficientas, W/(m·K).

Šilumos perdavimo koeficiento lygtis gali būti praplėsta daugiasluoksnei cilindrinei sienelei:

$$k_c = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1 \cdot d_1} + \sum_{i=1}^{n}\left(\frac{1}{2 \cdot \lambda_i} \cdot ln\frac{d_{i+1}}{d_i}\right) + \frac{1}{\alpha_2 \cdot d_2}}. \quad (12.190)$$

Viensluoksnės cilindrinės sienelės paviršių temperatūra apskaičiuojama pagal šias lygtis:

$$t_{p_1} = t_1 - \frac{q_l}{\pi} \cdot \frac{1}{\alpha_1 \cdot d_1};$$

$$t_{p_2} = t_1 - \frac{q_l}{\pi} \cdot \left(\frac{1}{\alpha_1 \cdot d_1} + \frac{1}{2 \cdot \lambda} \cdot ln\frac{d_2}{d_1}\right) = t_2 + \frac{q_l}{\pi} \cdot \frac{1}{\varepsilon_2 \cdot d_2}.$$

Daugiasluoksnės cilindrinės sienelės temperatūra riboje tarp i-ojo ir $i + 1$ sluoksnių apskaičiuojama pagal lygtį

$$t_{p,i+1} = t_1 - \frac{q_l}{\pi} \cdot \left(\frac{1}{\alpha_1 \cdot d_1} + \frac{1}{2 \cdot \lambda_1} \cdot ln\frac{d_2}{d_1} + \ldots + \frac{1}{2 \cdot \lambda_i} \cdot ln\frac{d_{i+1}}{d_i}\right).$$

Šilumos srauto tankis:

- vamzdžio vidinio paviršiaus atžvilgiu:

$$q_v = \frac{q_l}{\pi \cdot d_1}; \quad (12.191)$$

- vamzdžio išorinio paviršiaus atžvilgiu:

$$q_i = \frac{q_l}{\pi \cdot d_2}. \qquad (12.191a)$$

Kai $\frac{d_2}{d_1} < 2$, vamzdžiai vadinami plonasieniais. Tokie yra apvalkalinių šilumokaičių vamzdžiai. Plonasienių vamzdžių šilumos perdavimo koeficientas k, W/(m^2·K), gali būti skaičiuojamas kaip ir plokščios sienelės pagal toliau pateiktą lygtį, nes skaičiavimų paklaida neviršija 4 %:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2} + R_u};$$

čia R_u – terminis teršalų pasipriešinimas iš abiejų šilumos pernašos paviršiaus pusių: $R_u = R_{u1} + R_{u2}$.

Nustatant skaičiuojamąjį vamzdžio skersmenį d_s, laikomasi tokių taisyklių:

kai $\alpha_1 > \alpha_2$, $d_s = d_2$;
kai $\alpha_1 \approx \alpha_2$, $d_s = 0{,}5 \cdot (d_1 + d_2)$;
kai $\alpha_1 < \alpha_2$, $d_s = d_1$.

Tada

$$Q = k \cdot F \cdot (t_1 - t_2) = k \cdot \pi \cdot d_s \cdot l \cdot (t_1 - t_2). \qquad (12.192)$$

Šilumokaičių vamzdeliai yra plonasieniai ($\frac{d_2}{d_1} < 1{,}4$). Jų šilumos perdavimo koeficientas apskaičiuojamas pagal plokščios sienelės lygtį:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_s}{\lambda_s} + \frac{1}{\alpha_2} + R_u}.$$

Paklaida neviršys 1...3 % R_u vertės. Daugeliui šilumokaičių ir technologinių teršalų šilumos perdavimo koeficientų vertės nurodomos žinynuose. Apytiksliai nuosėdas galime vertinti taip:

$$k = \varphi \cdot k_o; \qquad (12.193)$$

čia k_o – švarios sienelės šilumos perdavimo koeficientas; φ – nuosėdas vertinantis koeficientas. Jis dažniausiai būna lygus $\varphi = 0{,}65...0{,}85$, kai iš šilumos pernašoje dalyvaujančių fluidų intensyviai krinta nuosėdos (pvz., ant kristalizatorių šaldymo paviršių), $\varphi = 0{,}4...0{,}5$.

12.5.3. Bendra šilumos ir masės pernaša

Jeigu konvekcinė šilumos pernaša vyksta kartu su masės pernaša, pvz., garavimu ar garų kondensacija iš garų ir dujų mišinio, vartojama bendrojo, arba efektyviojo, šilumos atidavimo koeficiento sąvoka. Dažniausiai galimi tokie atvejai:

a) dujos šildomos garuojant skysčiui. Tokiu atveju efektyvusis šilumos atidavimo koeficientas apskaičiuojamas pagal lygtį

$$\alpha = \alpha_k + \beta_p \cdot r \cdot \frac{p_s - p}{t_s - t_f}; \qquad (12.194)$$

čia α_k – dujų šilumos konvekcinio atidavimo koeficientas; β_p – masės atidavimo dėl garavimo koeficientas; r – savitoji garavimo šiluma; p_s – sočiųjų garų slėgis; p – garų dalinis slėgis mišinyje; t_f – mišinio temperatūra.

b) *dujų ir garų* mišinio aušinimas, kai drėkinamasis skystis garuoja. Šiuo atveju efektyvusis šilumos atidavimo koeficientas apskaičiuojamas taip:

$$\alpha = \alpha_k - \beta_p \cdot r \cdot \frac{p_s - p}{t_f - t_s}. \qquad (12.195)$$

Atstojamasis šilumos srauto tankis

$$q = q_k - q_m; \qquad (12.196)$$

čia q_k – konvekcinis šilumos srautas; q_m – šilumos srautas, atsirandantis dėl masės pernešimo.

c) garų kondensacijos iš *garų ir dujų* mišinio atveju

$$q = q_k + q_m. \qquad (12.197)$$

Tada efektyvusis šilumos atidavimo koeficientas apskaičiuojamas pagal lygtį

$$\alpha = \alpha_k + \beta_p \cdot r \cdot \frac{p_s - p}{t_s - t_f}. \qquad (12.198)$$

Tuo atveju, kai paviršius drėkinamas pilant skystį ir dėl jo intensyvaus garavimo ar dėl garų kondensacijos plėvelės storis yra labai mažas arba kai kondensacija yra lašelinė, galioja šios sąlygos:

$$p_s = p_f; \quad t_s = t_f.$$

Tai tinka oro kondicionavimo sistemoms, džiovykloms plačiame temperatūros ir drėgnumo diapazone bei kitiems įrenginiams.

Masės atidavimo kriterinė lygtis, kaip ir šilumos atidavimo kriterijų lygtis, užrašoma taip:

$$Sh = f(Re, Gr, Sc); \qquad (12.199)$$

čia $Sh = \frac{\beta \cdot l}{D}$ – Šervudo kriterijus (Nuselto kriterijaus analogas); $Sc = \frac{\nu}{D}$ – Šmidto kriterijus (Prandtlio kriterijaus analogas); D – vandens garų difuzijos ore koeficientas, m^2/s; $\beta = \frac{Sh \cdot D}{l}$ – masės atidavimo koeficientas, m/s.

Labai dažnai nagrinėjami masės mainai tarp kietojo arba skystojo kūno paviršiaus ir jį aptekančio dujų srauto (pvz., kieto kūno sublimacija arba skysčio garavimas į juos aptekantį dujų srautą). Šiuo atveju masės srautas (kg/s), tenkantis ploto vienetui, arba masės srauto tankis m, $kg/(m^2 \cdot s)$, aprašomas lygtimi:

$$m = \beta \cdot (\rho_p - \rho_f);$$

čia ρ_p ir ρ_f – pernešamo komponento koncentracijos (mišinio tankiai) paviršiuje ir srauto branduolyje, kg/m^3.

Masės atidavimo koeficientas β, kaip ir šilumos atidavimo koeficientas α, nustatomas naudojant kriterinės lygtis. Jos yra analogiškos šilumos atidavimo kriterinėms lygtims, laikant, kad koeficiento ir laipsnio rodiklių vertės tokios pat kaip ir atitinkamose šilumos atidavimo kriterinėse lygtyse.

Šilumos ir masės mainų analogija yra tik apytikslė. Ji tinka tada, kai tiek koncentracijos, tiek temperatūrų gradientai yra nedideli. Kitais atvejais lygtys šilumos ir masės mainams skaičiuoti gali gerokai skirtis.

12.5.4. Šilumos perdavimas per briaunotus paviršius

Kai abipus sienelės viena iš šiluminių varžų gerokai didesnė už kitą, kaip, pvz., per sienelę perduodant dujų šilumą vandeniui, $\alpha_1 << \alpha_2$, šiluminėms varžoms sulyginti didesniąją iš jų mažiname. Tuomet ten, kur šiluminė varža didelė, paviršiai daromi briaunoti (12.14 pav.).

Panagrinėkime sienelę, kurios storis δ_s ir kurios viename šone yra briaunos. Suminis šilumos srautas nuo temperatūros t_b briaunoto paviršiaus į aplinką

$$Q = \alpha_b \cdot F_b \cdot (t_b - t_o) + \alpha_s \cdot F_s \cdot (t_s - t_o); \qquad (12.200)$$

čia t_b – vidutinė briaunos temperatūra; t_o – aplinkos temperatūra; t_s – nebriaunoto paviršiaus dalies temperatūra.

Pertvarkę (12.200) lygtį, gauname:

$$Q = \left(\alpha_b \cdot \frac{t_b - t_o}{t_s - t_o} \cdot F_b + \alpha_s \cdot F_s \right) \cdot (t_s - t_o) . \qquad (12.201)$$

Jeigu $\eta_b = \frac{t_b - t_o}{t_s - t_o}$ yra briaunos efektyvumas, arba briaunos naudingumo koeficientas, kuris rodo šilumos srauto nuo briaunos santykį su maksimaliai galimu srautu, kai jos medžiagos $\lambda \to \infty$, tuomet

$$Q = (\alpha_b \cdot \eta_b \cdot F_b + \alpha_s \cdot F_s) \cdot (t_s - t_o) . \qquad (12.202)$$

Gautą lygtį pakeičiame šia:

$$Q = \alpha_m \cdot \eta_o \cdot (t_s - t_o) \cdot (F_b + F_s) ; \qquad (12.203)$$

čia η_o – briaunoto paviršiaus efektyvumas, įvertinantis jos vidutinį temperatūros skirtumą nuo t_s.

Kai $\alpha_s \cong \alpha_b \cong \alpha_m$, palyginę (12.202) ir (12.203) lygtis, gauname:

$$\eta_o = \frac{F_s}{F_s + F_b} \cdot \frac{\alpha_s}{\alpha_m} + \frac{F_b}{F_s + F_b} \cdot \frac{\alpha_b}{\alpha_m} \cdot \eta_b ; \qquad (12.204)$$

$$\eta_o = \frac{1}{\beta} \cdot \frac{\alpha_s}{\alpha_m} + \frac{\beta - 1}{\beta} \cdot \frac{\alpha_b}{\alpha_m} \cdot \eta_b , \qquad (12.205)$$

arba

$$\eta_o = 1 - \frac{\beta - 1}{\beta} \cdot (1 - \eta_b) ; \qquad (12.206)$$

čia $\beta = \frac{F_s + F_b}{F_w} \geq 1$ – paviršiaus briaunotumo koeficientas.

Atsižvelgiant į visa tai, plokščios briaunotos sienelės šilumos perdavimo koeficientą būtų galima apskaičiuoti pagal lygtį

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_s}{\lambda_s} + \frac{1}{\alpha_b \cdot \beta \cdot \eta_o + R_u}} , \qquad (12.207)$$

arba

$$k = \frac{1}{d_m \cdot \left(\frac{1}{\alpha_1 \cdot d_1} + \frac{1}{2 \cdot \lambda_s} \cdot ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\alpha_2 \cdot \beta \cdot \eta_o} \right) + R_u} . \qquad (12.208)$$

Tuomet šilumos srauto lygtis atitinkamai galima užrašyti:

- plokščiai sienelei:

$$Q = k \cdot F_1 \cdot (t_{f_1} - t_{f_2}), \qquad (12.209)$$

kur F_1 – nebriaunotas paviršius;

- vamzdžiui:

$$Q = k \cdot \pi \cdot d_m \cdot l \cdot (t_{f_1} - t_{f_2}). \qquad (12.209a)$$

Dar aptarkime briaunos efektyvumą, arba briaunos naudingumo koeficientą η_b (technikoje naudojamos briaunos parodytos 12.14 paveiksle). Jis apskaičiuojamas pagal lygtį

$$\eta_b = \frac{th(m \cdot h')}{m \cdot h'}; \qquad (12.210)$$

čia $m = \sqrt{\frac{2 \cdot \alpha_b}{\lambda_b \cdot \delta_b}}$; λ_b – briaunos šiluminio laidžio koeficientas, W/(m·K); δ_b – briaunos storis, m. Trapecinės briaunos $\delta_b = 0{,}75 \cdot \delta_{max} = 0{,}75 \cdot \delta_o$; h – briaunos aukštis, m; h' – sąlyginis briaunos aukštis, m, priklausantis nuo jos formos ir matmenų.

Dydis h', įeinantis į η_b išraišką, nustatomas taip:

- esant tiesioms briaunoms, $h' = h$;
- esant apvalioms briaunoms,

$h = 0{,}5 \cdot (d_2 - d_1)$ ir $h' = h \cdot (1 + 0{,}35 \cdot \ln \rho)$, o $\rho = d_2 / d_1$;

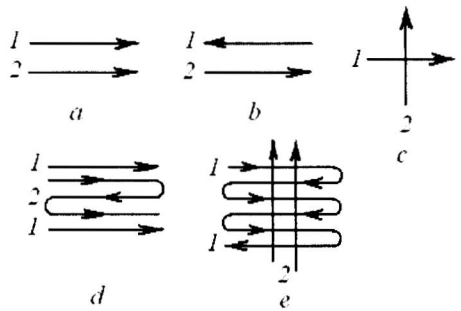
- esant stačiakampėms briaunoms,

$h = 0{,}5 \cdot (A - d_1)$; $h' = h \cdot (1 + 0{,}35 \cdot \ln \rho)$, o $\rho = 1{,}28 \cdot \frac{B}{d_1} \cdot \sqrt{\frac{A}{B} - 0{,}2}$.

12.6. Šilumos pernašos procesų varos jėga

12.6.1. Šilumos pernašos procesų varos jėga ir fluidų tarpusavio judėjimo schemos

Šilumos pernašos procesų varos jėga gali būti nustatoma dviem būdais: 1) išreiškiama šilumnešių vidutiniu temperatūrų skirtumu; 2) apskaičiuojama atsižvelgiant į šilumos pernašos proceso šilumokaityje efektyvumą. Pirmasis metodas yra grafinis, tinka paprastesniems (apytiksliams) skaičiavimams. Šilumos pernašos efektyvumo metodas remiasi analitinėmis išraiškomis, todėl geriau tinka kompiuteriniam šilumokaičių skaičiavimui.



12.27 pav. Fluidų tekėjimas šilumokaičiuose: *a* – pasrovinis; *b* – priešsrovinis; *c* – kryžminis; *d* – mišrus daugiaėjis; *e* – mišrus susikertantis

Abu metodai, gauti naudojant šilumos balanso ir proceso kinetikos lygtis, yra identiški, duoda tą patį rezultatą, todėl abu vienodai plačiai taikomi.

Šilumos pernašos procesų varos jėgos tiesiogiai priklauso nuo šilumnešių tarpusavio judėjimo schemos (12.27 pav.).

Aptarkime pagrindines šilumnešių judėjimo schemas. Jos skirstomos į elementariąsias ir mišriąsias.

Elementariosios šilumnešių judėjimo schemos dar skirstomos į tris grupes:

- abu šilumnešiai juda lygiagrečiai ir viena kryptimi (12.27 pav., *a*). Toks šilumnešių judėjimas vadinamas tiesiasroviu (pasroviniu);
- abu šilumnešiai juda lygiagrečiai ir priešingomis kryptimis šilumos pernašos paviršiaus atžvilgiu (12.27 pav., *b*). Toks šilumnešių judėjimas vadinamas priešsroviniu;
- vienas fluidas teka išilgai kanalo, kitas vamzdeliais jam statmena kryptimi. Toks judėjimas vadinamas kryžminiu (12.27 pav., *c*).

Mišriosios srovės gaunamos kombinuojant elementarias sroves. Jos skirstomos į dvi grupes:

- mišriosios daugiaėjės šilumnešio schemos (12.27 pav., *d*);
- mišriosios susikertančios šilumnešio schemos (12.27 pav., *e*).

Daugiaėjės šilumnešių judėjimo schemos.

Didelės šilumos atidavimo (perdavimo) koeficientų vertės dažniausiai pasiekiamos padidinant šilumnešių greičius. Didėjant šilumnešio srauto greičiui, mažėja jo tekėjimo skerspjūvio plotas, vamzdelių skaičius ir didėja jų ilgis, kadangi šilumos pernašos plotas didėja kur kas lėčiau. Tuo atveju, kai reikalingas vamzdžių ilgis viršija standartinį (6...7 m), galimos dvi šilumos pernašos proceso organizavimo schemos.

Jei vamzdelių yra gana daug, bet jie telpa į leistino skersmens apvalkalą, būtinas fluido tekėjimo kelias (vamzdžių ilgis) L užtikrinamas nuosekliai sujungiant du arba kelis aparatus, kurių kiekvienas turi vienodą standartinį vamzdžių skaičių ir ilgį.

Kai vamzdelių nedaug, jų ilgį galima padidinti viename apvalkale (korpuse) įrengiant dvi ar daugiau nuosekliai sujungtas ėjas. Tokie aparatai vadi-

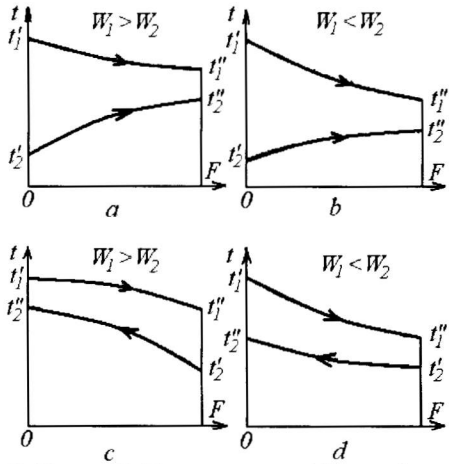
nami daugiaėjais. Tarpvamzdinėje erdvėje dažniausiai naudojama viena ėja ir srauto greitis didinamas skersinėmis pertvaromis.

Mišriosios susikertančiosios srovės.

Mišriosios susikertančiosios srovės šilumokaičiuose naudojamos ne dėl šilumos perdavimo pranašumų, bet dėl konstrukcijos reikalavimų. Dažniausiai naudojami tokie susikertančiųjų srovių aparatų variantai:

a) kai vienas fluidas teka lygiagrečiu vamzdžiu pluoštu (nesusimaišo), o kitas ištisiniu srautu tarpvamzdinėje erdvėje (susimaišo);

b) kai abu fluidai teka ištisiniais srautais (susimaišančiais srauto viduje), apiplaudami skirtingas šilumą perduodančios sienelės puses. Tokie yra plokšteliniai aparatai;



12.28 pav. Fluidų temperatūros kitimo schema: *a, b* – kai fluidų tekėjimas pasrovinis; *c,d* – kai fluidų tekėjimas priešsrovinis

c) kai vienas šilumnešis teka lygiagrečių vamzdžių pluošte viena ar keliomis ėjomis, kitas – zigzaginiu keliu tarpvamzdinėje erdvėje.

Tuo atveju, kai zigzagų yra daugiau nei keturi, schema yra mišri, bet ją galima skaičiuoti kaip priešsrovinę ir paklaida bus nedidelė.

12.28 pav. parodyta, kaip priklausomai nuo fluidų srautų šiluminių talpų W_1/W_2 santykio gali kisti fluidų temperatūros išilgai šilumos pernašos paviršiaus F.

Srauto šiluminė talpa W, W/K, apskaičiuojama taip:

$$W_1 = m_1 \cdot c_{p_1} \text{ ir } W_2 = m_2 \cdot c_{p_2}; \qquad (12.211)$$

čia m_1 ir m_2 – karštojo ir šaltojo fluidų masės debitai, kg/s; c_{p1} ir c_{p2} –atitinkamai jų savitosios šilumos, J/(kg·K).

Staigiau kinta tos medžiagos temperatūra, kurios srauto šiluminė talpa mažesnė.

Vidutinis šilumnešių temperatūrų skirtumas (12.29 pav.) apskaičiuojamas iš elementarių šilumos perdavimo paviršiui dF ir visam paviršiui šilumos balanso lygčių:

$$dQ = k \cdot (t_1 - t_2) \cdot dF ; \qquad (12.212)$$

$$dQ = -W_1 \cdot dt_1 ; \qquad (12.213)$$

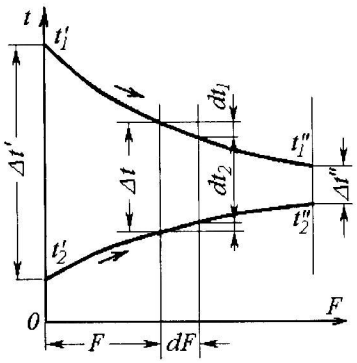
$$dQ = W_2 \cdot dt_2 . \qquad (12.214)$$

Iš temperatūrų kitimo grafiko matome, kad temperatūra t_1 mažėja, todėl dt_1 yra neigiamas dydis, temperatūra t_2 didėja, todėl ir dt_2 didėja.

Iš (12.213) ir (12.214) lygčių išreiškiame dt_1 ir dt_2 ir jas atimame:

$$d(t_1 - t_2) = dt_1 - dt_2 = -dQ \cdot \left(\frac{1}{W_1} + \frac{1}{W_2} \right) = -m \cdot dQ ; \qquad (12.215)$$

čia $m = \frac{1}{W_1} + \frac{1}{W_2}$. (12.216)



12.29 pav. Fluidų temperatūrų skirtumo kitimas išilgai šilumokaičio paviršiaus

Iš (12.215) lygties išsireiškiame dQ:

$$dQ = -\frac{d(t_1 - t_2)}{m} = k \cdot (t_1 - t_2) \cdot dF ; \qquad (12.217)$$

iš čia

$$dF = -\frac{1}{m \cdot k} \cdot \frac{d(t_1 - t_2)}{(t_1 - t_2)} = \frac{dQ}{k \cdot (t_1 - t_2)} . \qquad (12.218)$$

Integruodami gauname:

$$F = -\frac{1}{m \cdot k} \cdot \int_{\Delta t'}^{\Delta t''} \frac{d(t_1 - t_2)}{(t_1 - t_2)} = -\frac{1}{m \cdot k} \cdot ln \frac{\Delta t''}{\Delta t'} = \frac{1}{m \cdot k} \cdot ln \frac{\Delta t'}{\Delta t''};$$

(12.219)

tuo pat metu

$$F = \frac{Q}{k \cdot \Delta t_m}. \qquad (12.219a)$$

Palyginę (12.219) ir (12.219a) lygtis, gauname:

$$\frac{Q}{k \cdot \Delta t_m} = \frac{1}{m \cdot k} \cdot ln \frac{\Delta t'}{\Delta t''} \text{ ir } \Delta t_m = \frac{m \cdot Q}{ln \frac{\Delta t'}{\Delta t''}}. \qquad (12.220)$$

Iš čia išreiškiame sandaugą $m \cdot Q$:

$$m \cdot Q = \left(\frac{1}{W_1} + \frac{1}{W_2} \right) \cdot Q = \frac{Q}{W_1} + \frac{Q}{W_2} = (t_1' - t_1'') + (t_2'' - t_2'). \quad (12.221)$$

Kai šilumnešiai teka pasroviui,

$$m \cdot Q = t_1' - t_1'' + t_2'' - t_2' = (t_1' - t_2') - (t_1'' - t_2'') = \Delta t' - \Delta t'' = \Delta t_{max} - \Delta t_{min}. \quad (12.222)$$

Prieš srovę tekančių abiejų šilumnešių temperatūros išilgai šilumos pernašos paviršiaus mažėja $(dQ = W_2 \cdot dt_2)$, todėl

$$m \cdot Q = t_1' - t_1'' - t_2' + t_2'' = (t_1' - t_2') - (t_1'' - t_2'') = \Delta t' - \Delta t''. \quad (12.223)$$

Todėl vidutinis temperatūrų skirtumas

$$\Delta t_m = \frac{\Delta t' - \Delta t''}{ln \frac{\Delta t'}{\Delta t''}}. \qquad (12.224)$$

Dažnai ši lygtis užrašoma taip:

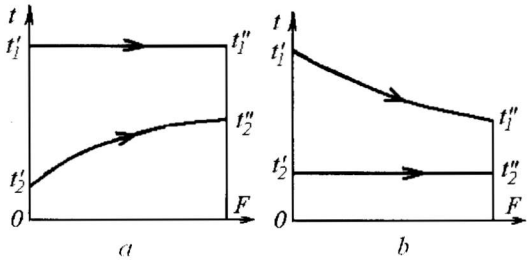
$$\Delta t_m = \frac{\Delta t_{max} - \Delta t_{min}}{ln \frac{\Delta t_{max}}{\Delta t_{min}}}.$$

Ši lygtis galioja, kai nesikeičia fluidų agregatinė būsena ir šilumos perdavimo koeficientas nepriklauso nuo temperatūros ir šilumos pernašos procese nėra šilumos nuostolių į aplinką.

Atskirais atvejais, kai kinta vieno iš fluidų agregatinė būsena, tačiau jo temperatūra nekinta (12.30 pav.), karštasis fluidas kondensuojasi: $t_1' = t_1'' = t_s(p) = const$, šaltasis fluidas pašyla nuo t_2' iki t_2'':

$$Q = W_1 \cdot (t_1' - t_1'') = W_2 \cdot (t_2'' - t_2') = const. \qquad (12.225)$$

Kadangi $\delta t_1 \to 0$, tai $W_1 \to \infty$. Šiuo atveju temperatūros keisis, kaip pavaizduota 12.30 pav., *a*.



12.30 pav. Temperatūrų kitimo grafikas karštajam fluidui kondensuojantis (*a*) arba šaltajam fluidui verdant (*b*)

Δt_m vertė šiuo atveju nepriklauso nuo medžiagos tarpusavio judėjimo schemos ir apskaičiuojama pagal šią lygtį:

$$\Delta t_m = \frac{\Delta t' - \Delta t''}{ln\frac{\Delta t'}{\Delta t''}} = \frac{t_2'' - t_2'}{ln\frac{\Delta t'}{\Delta t''}}. \qquad (12.226)$$

Kai šaltasis fluidas verda, o karštasis dėl to atšąla:

$t_2' = t_2'' = t_s(p)$,

$Q = W_1 \cdot (t_1' - t_1'') = W_2 \cdot (t_2'' - t_2') = const$.

Kadangi $\delta t_2 \to 0$, tai $W_2 \to \infty$. Temperatūrų kitimo grafikas pavaizduotas 12.30 pav., *b*.

Šiuo atveju Δt_m vertė nepriklauso nuo fluidų tarpusavio judėjimo schemos ir apskaičiuojama taip:

$$\Delta t_m = \frac{\Delta t' - \Delta t''}{ln\frac{\Delta t'}{\Delta t''}} = \frac{t_1' - t_1''}{ln\frac{\Delta t'}{\Delta t''}}. \qquad (12.227)$$

Palyginame pasrovinio ir priešsrovinio fluidų tekėjimo schemas. Esant vienodoms fluidų pradinėms ir galinėms temperatūroms $(t_1', t_1'', t_2', t_2'') = idem$, akivaizdu, kad $(\Delta t_m)_p > (\Delta t_m)_t$ ir $F_p < F_t$. 12.28 pav. pateiktos šilumnešių temperatūrų kitimo schemos rodo, kad, fluidui tekant pasroviui, visada $t_2'' < t_1''$. Priešsroviniame šilumokaityje aušinant fluidą galima pasiekti $t_2'' > t_1''$ arba $t_1'' < t_2''$.

Priešsroviniame šilumokaityje fluidą galima daugiau pašildyti arba daugiau atšaldyti. Todėl šildančiojo (aušinančiojo) fluido debitas priešsroviniame šilumokaityje yra mažesnis nei pasroviniame. Tai visiškai suprantama, nes, Δt_m mažėjant, F didėja. Kadangi praktikoje šilumos mainus dažnai lemia debito mažėjimas, priešsrovinis šilumokaitis tuo atžvilgiu pranašesnis už pasrovinį.

Pasrovinis ir priešsrovinis šilumokaičiai praktiškai yra lygiaverčiai:

- kai Δt_m gerokai (> 5 kartus) viršija kurios nors medžiagos temperatūrų skirtumą;
- kai srautų šiluminės talpos labai skiriasi viena nuo kitos – $W_1 / W_2 < 0{,}05$ ir $W_1 / W_2 > 10$, tuomet vieno fluido temperatūra pasikeičia mažai.

12.6.2. Grafinis ir analitinis mišrių daugiaėjų ir susikertančiųjų srovių Δt_m nustatymas

Jeigu šilumokaityje naudojama mišri daugiaėjė ar mišri susikertančiųjų srovių schema ir jei šilumnešiai šilumos pernašos procese nekeičia savo fazinės būsenos, Δt_m gali būti nustatomas grafiniais metodais (12.31 pav.). Iš paveikslo parinkus $\varepsilon_{\Delta t}$ vertę, Δt_m apskaičiuojamas pagal lygtį

$$\Delta t_m = \Delta t_{m,\,pr} \cdot \varepsilon_{\Delta t}; \qquad (12.228)$$

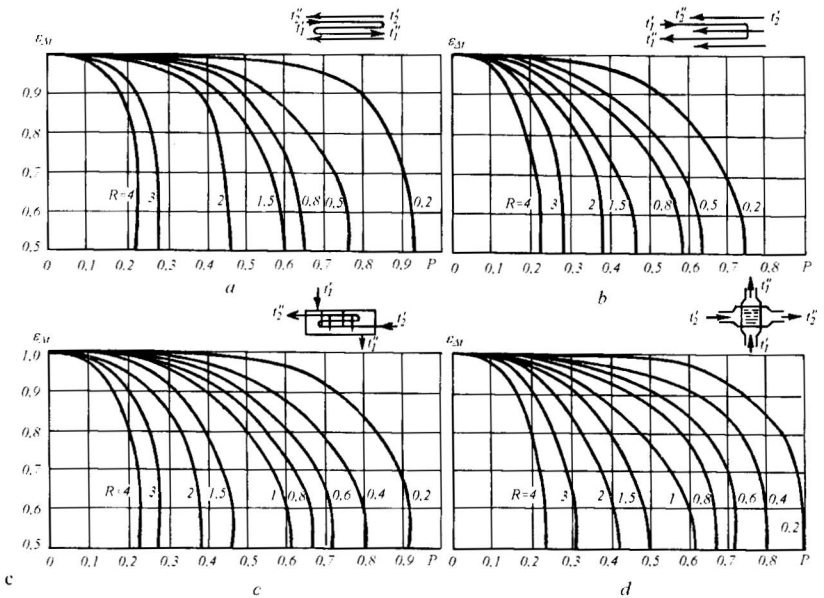
čia $\Delta t_{m,\,pr}$ – vidutinis logaritminis temperatūrų skirtumas priešsrovinio tekėjimo atveju; $\varepsilon_{\Delta t}$ – pataisos koeficientas, įvertinantis realią fluidų judėjimo schemą.

Prieš skaičiuojant šiuo metodu Δt_m, nubraižoma t–F diagrama, kaip tai parodyta 12.28 pav., ir patikrinama, ar temperatūrų kitimo išilgai paviršiaus kreivės nesikerta. Jei kertasi, tiriamojo proceso vykdyti negalima.

Pataisos koeficientas priklauso nuo parametrų P ir R. Šie parametrai yra atitinkamų temperatūrų skirtumų santykiai ir apskaičiuojami pagal lygtis

$$R = \frac{t_1' - t_1''}{t_2'' - t_2'} = \frac{\delta t_1}{\delta t_2}; \qquad (12.229)$$

$$P = \frac{t_2'' - t_2'}{t_1' - t_2'} = \frac{\delta t_2}{\delta t_{max}}. \qquad (12.230)$$



12.31 pav. Pataisos koeficiento vertės esant įvairioms šilumnešių tekėjimo apvalkaliniuose vamzdiniuose šilumokaičiuose schemoms: *a* – daugiaėjis priešsrovinis tekėjimas, *b* – paprastas mišrus tekėjimas, *c* – daugiaėjis kryžminis tekėjimas, *d* – paprastas kryžminis tekėjimas

Jeigu grafike nerandame apskaičiuotų R ir P parametrų verčių, tai jų ekstrapoliuoti už pateiktų kreivių ribų nereikia. Tokiu atveju Δt_m geriau skaičiuoti pagal aritmetinį vidurkį: $\Delta t_m = \Delta t_{ar} = 0{,}5 \cdot (\Delta t_1 + \Delta t_2)$, arba taikyti kitus sprendimo metodus, pvz., nagrinėti toliau pateiktą analitinį Δt_m skaičiavimo metodą.

Tarkim, projektuojame šilumokaitį su sudėtinga šilumnešių tekėjimo schema. Sudarome tariamai priešsrovinį tekėjimą, apskaičiuojame temperatūrų skirtumus $\Delta t' = t_1' - t_2'$ ir $\Delta t'' = t_1'' - t_2''$. Jeigu $0{,}5 < \dfrac{\Delta t'}{\Delta t''} < 2$, vidutinis temperatūrų skirtumas apskaičiuojamas kaip vidutinis aritmetinis dydis:

$$\Delta t_m = \Delta t_{ar} = 0{,}5 \cdot (\Delta t' + \Delta t'') . \qquad (12.231)$$

Jei ši sąlyga netenkinama, tai Δt_m apskaičiuojamas pagal toliau užrašytas analitines lygtis. Tarkim, vienas fluidas teka vamzdžiais per lyginį ėjų skaičių, o kitas fluidas – tarpvamzdinėje erdvėje viena priešsrovine ėja. Vidutinis temperatūrų skirtumas apskaičiuojamas pagal lygtį

$$\Delta t_m = \frac{M}{\ln \dfrac{\Delta t_{\max} + \Delta t_{\min} + M}{\Delta t_{\max} + \Delta t_{\min} - M}}; \qquad (12.232)$$

čia Δt_{max} *ir* Δt_{min} – didžiausias ir mažiausias temperatūrų skirtumai;

$$M = \sqrt{\delta t_1^2 + \delta t_2^2} \qquad (12.232a)$$

Ši lygtis tinka ir tuo atveju, kai tarpvamzdinėje erdvėje įrengtos pertvaros ir jų skaičius $z \geq 3$.

Esant daugkartiniam mišriam srautui, kai tarpvamzdinėje erdvėje vienas fluidas teka per lyginį ėjų skaičių, o kitas fluidas vamzdžiais teka per kartotinį taip pat lyginį priešsrovinių ėjų skaičių, Δt_m apskaičiuojamas pagal lygtį

$$\Delta t_m = \frac{M}{N \cdot ln \dfrac{\Delta t + M}{\Delta t - M}}; \qquad (12.233)$$

čia N – ėjų tarpvamzdinėje erdvėje skaičius;

$$\Delta t = \Delta t_{max} - \Delta t_{min} \frac{\sqrt[N]{\Delta t_{max}} + \sqrt[N]{\Delta t_{min}}}{\sqrt[N]{\Delta t_{max}} - \sqrt[N]{\Delta t_{min}}}. \qquad (12.234)$$

Kai turime paprastą kryžminį srautą, kuriame vienas fluidas teka vamzdžiais ir nesimaišo, o kitas teka tarpvamzdinėje erdvėje ir maišosi, Δt_m galime apskaičiuoti pagal šią lygtį:

$$\Delta t_m = \frac{\delta t_v}{ln \dfrac{1}{1 + \dfrac{\delta t_v}{\delta t_{tv}} ln\left(1 - \dfrac{\delta t_{tv}}{\delta t_{prad}}\right)}}; \qquad (12.235)$$

čia $\delta t_v = t_2'' - t_2'$; $\delta t_{tv} = t_1' - t_1''$; $\delta t_{prad} = t_1' - t_2' = \Delta t_{max}$.

Nesvarbu, kuris fluidas teka vamzdžiais, o kuris tarpvamzdinėje erdvėje.

Aptarkime, kaip apskaičiuojamos kiekvieno fluido (šilumnešio) temperatūros vidutinės vertės šilumokaityje. Pagal šias fluidų temperatūras nustatome šilumos atidavimo koeficientus.

To fluido, kurio absoliutusis temperatūros pokytis yra mažesnis, temperatūra apskaičiuojama kaip vidutinė aritmetinė. Pvz., jei $(t_1' - t_1'') < (t_2'' - t_2')$, tai $t_{1m} = 0{,}5 \cdot (t_1' + t_1'')$. (12.236)

Tada antrojo fluido vidutinė temperatūra

$$t_{2m} = t_{1m} \pm \Delta t_m;$$

čia Δt_m – vidutinis fluidų temperatūrų skirtumas.

Jeigu vieno fluido temperatūra yra pastovi (pvz., esant garų kondensacijai), tai imame

$$t_{1m} = t_k(p_s) \text{ ir } t_{2m} = t_k - \Delta t_m; \quad (12.237)$$

čia t_k – garų kondensacijos temperatūra, atitinkanti sotinimo slėgį p_s.

12.6.3. Šilumokaičių efektyvumo skaičiavimas

Projektuojant naujus šilumokaičius ir atliekant jau veikiančių šilumokaičių tikrinimo skaičiavimus, atsižvelgiama į šilumokaičių efektyvumą, kurį nusako šilumnešių srautų šiluminės talpos.

Šilumnešių srautų šiluminės talpos užrašomos sandauga:

$W_1 = (m \cdot c_p)_1$ – karštojo fluido srauto šiluminė talpa, W/K,

$W_2 = (m \cdot c_p)_2$ – šaltojo fluido srauto šiluminė talpa;

čia m – šilumnešio debitas, kg/s; c_p – šilumnešio savitoji šiluma, J/(kg·K).

Sandauga $m \cdot c_p$ išreiškia šilumos kiekį, kurį priima (ar atiduoda) fluido srautas, kg/s, pakitus jo temperatūrai 1 K (vienu laipsniu). Kartais srauto šiluminė talpa vadinama vandens ekvivalentu. Šildant temperatūra sparčiau kinta to šilumnešio, kurio mažesnis vandens ekvivalentas arba šiluminė talpa.

Šilumokaičio šiluminio naudingumo koeficientas ε, arba šilumnešio efektyvumas, apskaičiuojamas taip:

$$\varepsilon = \frac{Q}{Q_{max}} = \frac{W_1 \cdot (t_1' - t_1'')}{W_{min} \cdot (t_1' - t_2')} = \frac{W_2 \cdot (t_2'' - t_2')}{W_{min} \cdot (t_1' - t_2')}; \quad (12.238)$$

$$P = \frac{t_2'' - t_2'}{t_1' - t_2'} = \frac{\delta t_2}{\Delta t_{max}}, \quad (12.239)$$

arba $$\varepsilon = \frac{W_1 \cdot \delta t_1}{W_{\min} \cdot \delta t_{\max}} = \frac{W_2 \cdot \delta t_2}{W_{\min} \cdot \delta t_{\max}}. \qquad (12.240)$$

Šios lygties skaitiklyje yra vieno fluido kitam perduotas šilumos srautas, W:

$$Q = W_1 \cdot (t_1' - t_1'') = W_2 \cdot (t_2'' - t_2'). \qquad (12.241)$$

Vardiklyje yra maksimalus šilumos srautas Q_{max}, kurį galima perduoti idealiame priešsroviniame šilumokaityje su begaliniu šilumos pernašos paviršiumi (kai $F \to \infty$, $t_2'' \to t_1'$).

Tuomet δt_2 pasieks δt_{max}, o $\Delta t_1 \to 0$.

Mažiausias vandens ekvivalentas

$$W_{min} = min(W_1, W_2).$$

Matome, kad ε yra šilumos srautų santykis, nors atskirais atvejais gali būti:

$$\varepsilon = \frac{t_1' - t_1''}{t_1' - t_2'} = \frac{W_2 \cdot \delta t_2}{W_{min} \cdot \Delta t_{max}}, \text{ kai } W_1 = W_{min}, \qquad (12.242)$$

$$\varepsilon = \frac{W_1 \cdot \delta t_1}{W_{\min} \cdot \delta t_{\max}} = \frac{\delta t_2}{\Delta t_{\max}}, \text{ kai } W_2 = W_{min}. \qquad (12.243)$$

12.6.4. Kai kurių tipinių šilumokaičių efektyvumas

1. Priešsrovinio šilumokaičio efektyvumas ε išreiškiamas lygtimi

$$\varepsilon = \frac{1 - e^{-N \cdot (1-\omega)}}{1 - \omega \cdot e^{-N \cdot (1-\omega)}}; \qquad (12.244)$$

čia $$\omega = \frac{W_{min}}{W_{max}}, \quad N = \frac{kF}{W_{min}}. \qquad (12.244a)$$

Kai $\omega = \frac{W_{min}}{W_{max}} = 0$ (kondensatoriaus ir garintuvo atvejis),

$$\varepsilon = 1 - \exp(-N). \qquad (12.245)$$

Kai $\omega = \frac{W_{\min}}{W_{\max}} = 1$ (abu srautai turi vienodas šilumines talpas – regeneracijos atvejis),

$$\varepsilon = \frac{N}{1+N}. \tag{12.246}$$

2. Pasrovinio šilumokaičio efektyvumas išreiškimas lygtimi

$$\varepsilon = \frac{1-e^{-N\cdot(1+\omega)}}{(1+\omega)}. \tag{12.247}$$

Kai $\omega = \frac{W_{min}}{W_{max}} = 0$ (kondensatoriaus ir garintuvo atvejis),

$$\varepsilon = 1-e^{-N}. \tag{12.248}$$

Kai $\omega = \frac{W_{\min}}{W_{\max}} = 1$ (regeneratoriaus atvejis),

$$\varepsilon = \frac{1-\exp^{-2\cdot N}}{2}. \tag{12.249}$$

3. Kryžminės srovės atveju, kai vienas srautas susimaišo, kitas nesimaišo, ryšys tarp ε, N ir ω yra toks:

kai $W_{max} = W_{ns}$, $W_{min} = W_{sm}$,

$$\varepsilon = 1-e^{-L\cdot\frac{1}{\omega}}, \tag{12.250}$$

kur $L = 1-e^{-N\cdot\frac{1}{\omega}}$; (12.251)

kai $W_{max} = W_{sm}$, $W_{min} = W_{ns}$,

$$\varepsilon = \frac{1}{\omega}\cdot\left(1-e^{L'\cdot\omega}\right); \tag{12.252}$$

čia $L' = 1-e^{-N}$. (12.253)

Jei projektavimo sąlygos griežtai neapibrėžtos, geriau, kai $W_{sm} = W_{min}$, nes tuo atveju gauname didesnį ε.

12.6.5. φ srovių metodas šilumokaičio efektyvumui apskaičiuoti

Kiekvienai konkrečiai fluidų judėjimo schemai reikia naudoti savą, skirtingą nuo kitų schemų efektyvumo lygtį. Tai apsunkina skaičiavimus. Todėl buvo pasiūlyta paprasta ir universali apytikslė lygtis, tinkama kiekvienai fluidų judėjimo schemai. Jos esmė – universali srautų judėjimo schemos charakteristika, vadinamoji φ srovės funkcija. φ srovių metodo idėja paremta tuo, kad daugumos skirtingų schemų efektyvumas ε yra tarp priešsrovinės ir pasrovinės schemų efektyvumo:

$$\varepsilon_t < \varepsilon_\varphi < \varepsilon_p . \qquad (12.254)$$

Realioms schemoms vertinti naudojama funkcija

$$f_\varphi = 0{,}5 \cdot (1 - \cos\varphi). \qquad (12.255)$$

Kai $\varphi = 0$, tai $f_\varphi = 0$ ir $\varepsilon = \varepsilon_t$; kai $\varphi = \pi$, tai $f_\varphi = 1$, ir $\varepsilon = \varepsilon_p$, todėl, kai $0 \le \varphi \le \pi$, tai $0 \le f_\varphi \le 1$.

Randamas kiekvienai fluidų judėjimo schemai būdingas kampas arba f_φ vertė. Matematiškai vertinant, gauta tokia universali šilumos efektyvumo lygtis:

$$\varepsilon = \frac{W_2 \cdot (t_2'' - t_2')}{W_{min} \cdot (t_1' - t_2')} = \frac{W_1 \cdot (t_1' - t_1'')}{W_{min} \cdot (t_1' - t_2')} =$$

$$= \frac{1 - exp^{-N \cdot (1+\omega \cdot (1-2 \cdot f_\varphi))}}{1 + \omega \cdot (1 - f_\varphi) - \omega \cdot f_\varphi \cdot e^{-N(1+\omega \cdot (1-2 \cdot f_\varphi))}}. \qquad (12.256)$$

Patikriname gautą lygtį ribiniais atvejais:

- kai $f_\varphi = 0$, gauname $\varepsilon = \dfrac{1 - e^{-N(1+\omega)}}{1 + \omega}$ (pasrovinis atvejis);
- kai $f_\varphi = 1$, gauname $\varepsilon = \dfrac{1 - e^{-N(1+\omega)}}{1 - \omega \cdot e^{-N(1-\omega)}}$ (priesrovinis atvejis).

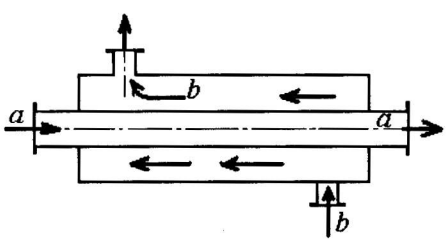
Fluidų judėjimo schemų charakteristikos funkcijos f_φ vertės nustatytos remiantis eksperimentais ir skaičiavimais.

13 DALIS

ŠILDYMAS, AUŠINIMAS, KONDENSACIJA

13.1. Šildymas

Cheminėje technologijoje apdorojamas medžiagas dažnai reikia šildyti. Šios medžiagos gali būti įvairios fazinės būsenos (kietos, skystos, dujinės). Šildoma specialiuose įrenginiuose, vadinamuose *šilumokaičiais.* Tai tokie aparatai, kuriuose vienos medžiagos šiluma perduodama kitai. Ta medžiaga, kuri atiduoda šilumą, vadinama *šildančiuoju fluidu*, arba *šildalu*, o kuri perima šilumą, – *šildomuoju fluidu*, arba *šaldalu* (*aušalu*). Paprasčiausio šilumokaičio schema pateikta 13.1 pav.



13.1 pav. Paprasčiausio šilumokaičio schema:
a – šildantysis fluidas, *b* – šildomasis fluidas

Jeigu šilumokaičio paskirtis yra šildyti medžiagą, tai jis vadinamas *šildytuvu*, jeigu išgarinti, – *garintuvu*, jeigu kondensuoti, – *kondensatoriumi* ir t. t. Tokį šilumokaitį, kuriame fluidai vienas su kitu liečiasi, įprasta vadinti *maišymosi*, arba *kontaktiniu*, šilumokaičiu. Jeigu fluidai atskirti sienele (nesiliečia), toks šilumokaitis vadinamas *paviršiniu*. Paviršius, per kurį iš šildančiojo fluido šiluma perduodama šildomajam, vadinamas aparato *šildomuoju paviršiumi.* Jeigu šilumokaita tarp fluidų ir sienelės vyksta ant skirtingų paviršių, tai toks šilumokaitis vadinamas *rekuperaciniu.* Tuo atveju, kai tą patį paviršių pakaitomis apiplauna tai šildantysis, tai šildomasis fluidas, turime *regeneracinį šilumokaitį.*

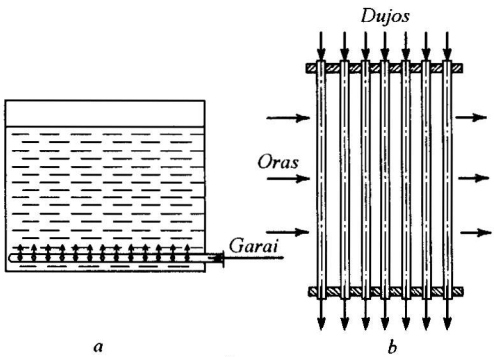
Šildančiuoju fluidu gali būti garai, aukštos temperatūros skystis, karštos dujos. Galima šildyti ir elektros srove.

13.1.1. Šildymo būdai

Šildymas garais. Šildoma vandens arba kitų aukštoje temperatūroje verdančių skysčių garais. Iki 150...160 °C temperatūros dažniausiai šildoma vandens garais. Šis šildantysis fluidas turi daug gerų savybių. Pavyzdžiui, kondensuojantis garams, išsiskiria daug jo garavimo šilumos, todėl šildymui sunaudojama palyginti mažai garų. Kondensuojantis garams šilumos atidavimo koeficiento α vertė yra $(4{,}6...17{,}4)\cdot 10^3$ W/(m^2·K), dėl to fluidui šildyti reikia gana mažo paviršiaus. Be to, labai gera ir svarbi sočiųjų garų, kaip šildančiojo fluido, savybė yra pastovi (esant pastoviam slėgiui) jo kondensacijos temperatūra, todėl visame šildymo tūryje galima palaikyti vienodą, pastovią temperatūrą. Keičiant garų slėgį, galima reguliuoti šildymo temperatūrą. Šildymo garais įrenginių naudingumo koeficientas yra gana didelis, ypač kai panaudojama dar ir garų kondensato šiluma.

Šildymui paprastai naudojami nedidelio slėgio (0,6...1,0 MPa) drėgni sotieji arba nedaug perkaitinti (Δt_p = *20...30* K) garai. Jų slėgis parenkamas pagal tai, kokia temperatūra turi būti šildytuve. Ekonominiais sumetimais tikslinga pirmiausia panaudoti iš turbinos ištekančius garus (priešslėgio turbinos išmetamus 0,2...0,3 MPa garus arba tarpinio ėmimo 0,6...0,7 MPa garus).

Šildymas gali būti dvejopas: *tiesioginis ir netiesioginis* (13.2 pav.). Tiesioginis – kai šildantysis fluidas tiesiogiai liečiasi su šildomuoju, o netiesioginis – kai fluidai tiesiogiai nesiliečia.



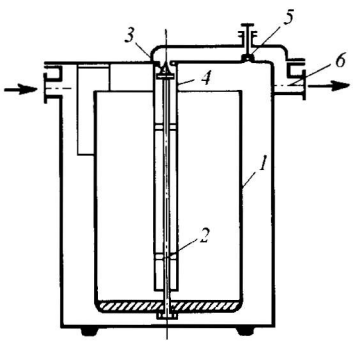
13.2 pav. Šildymas:
a – tiesioginis, *b* – netiesioginis

Kad iš šildytuvo neištekėtų nesusikondensavę garai, už šildymo aparato įrengiamas kondensato puodas, kurio paskirtis – išleisti kondensatą ir sulaikyti garus. Pramonėje naudojamo kondensato puodo schema pateikta 13.3 pav.

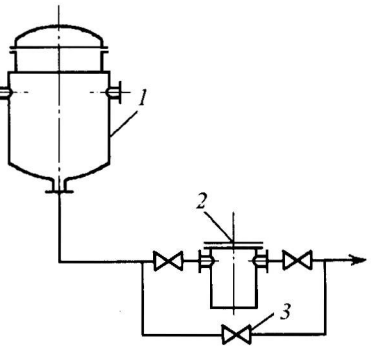
Iš šilumokaičio į kondensato puodą patekęs kondensatas pakelia cilindro formos plūdę *1*, kuri yra standžiai pritvirtinta prie koto *2* ir uždaro kondensato

išleidimo vožtuvą *3*. Toliau tekėdamas kondensatas pripildo cilindrinę plūdę, ir ši nugrimzdama atidaro kondensato išleidimo vožtuvą. Tuomet vamzdžiu *4* puode esantis kondensatas, slegiamas garų, teka į šalinimo liniją *6*. Pakilusi plūdė vėl uždaro išleidimo vožtuvą. Kondensato puodui prapūsti įrengtas vožtuvas *5*. Kondensato puodo prijungimo schema parodyta 13.4 paveiksle.

Didžiausias kaitinimo garais trūkumas tas, kad šis būdas netinka šildyti iki aukštų temperatūrų, nes tam reikia didelio slėgio garų. Pavyzdžiui, norint pašildyti medžiagą iki 364 °C temperatūros, sočiųjų garų slėgis turi būti 20,0 MPa. Tokiam šildymui reikia sudėtingos konstrukcijos ir brangios aparatūros, o tai yra neekonomiška.



13.3 pav. Kondensato puodas: *1* – cilindrinė plūdė, *2* – kotas, *3* – vožtuvas, *4* – vamzdis, *5* –prapūtimo vožtuvas, *6* – kondensato šalinimo linija



13.4 pav. Kondensato puodo prijungimo schema: *1* – šildytuvas, *2* – kondensato puodas, *3* – ventilis

Iki aukštos temperatūros gali būti šildoma aukštoje temperatūroje verdančių skysčių garais: gyvsidabrio, difenilo mišinio (73,5 % difenilo eterio C_6H_5–O–C_6H_5, 26,5 % difenilo C_6H_5–C_6H_5; šio mišinio virimo temperatūra 258 °C; jo tankis $\rho = 710$ kg/m^3, esant $t = 400$ °C; lydymosi temperatūra 12 °C). Difenilo mišiniu kaitinama, kai reikia pasiekti 260...400 °C temperatūrą. Naudojamas iki 0,8...1,0 MPa slėgis. Besikondensuojančio difenilo mišinio garų šilumos atidavimo koeficientas $\alpha = (1,40...1,75)\cdot 10^3$ W/(m^2·K). Difenilo mišinys beveik nekenksmingas sveikatai.

Gyvsidabrio garais kaitinama iki 350...500 °C. Besikondensuojančių gyvsidabrio garų šilumos atidavimo koeficientas $\alpha = 600$ W/(m^2·K). Gyvsidabris yra nuodingas, todėl rečiau vartojamas.

Šildymas skysčiais. Šilumokaičiuose kaip šildantysis fluidas gali būti naudojami karšti skysčiai: vanduo, aukštoje temperatūroje verdantys skysčiai, kai kurie tepalai, tetrachlordifenilas, naftalinas, glicerinas, organiniai silicio junginiai, kai kurių druskų tirpalai, kai kurie skystieji metalai. Šiuo atveju

pirmiausia reikia pašildyti patį šildantįjį fluidą. Dažniausiai jis šildomas cirkuliaciniu arba vonios būdu. Pirmuoju atveju šildantysis fluidas sušyla specialioje krosnyje – katile *1* ir, patekęs į šilumokaitį *2*, įgytą šilumą perduoda šildomajam fluidui (13.5 pav.). Fluido cirkuliacija yra uždara. Ji gali būti natūrali *(a)* arba priverstinė *(b)*. Kad fluidas natūraliai cirkuliuotų, šilumokaitis turi būti sumontuotas aukščiau šildymo įrenginio. Nuo jų padėties lygių skirtumo H, m, priklauso susidarantis slėgių skirtumas Δp ir cirkuliacijos greitis:

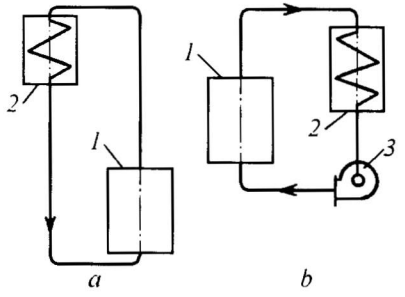
$$\Delta p = H \cdot g \cdot (\rho_2 - \rho_1); \qquad (13.1)$$

čia Δp – slėgių skirtumas, Pa; ρ_1, ρ_2 – skysčių tankiai šilumokaityje ir katile, kg/m^3; g – laisvojo kritimo pagreitis ($g = 9{,}81$ m/s^2).

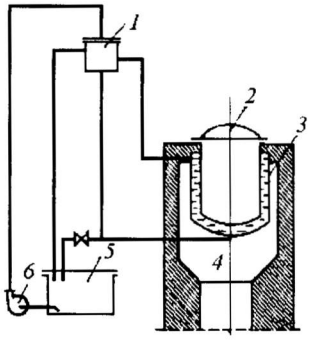
Šio slėgių skirtumo turi pakakti cirkuliacijos kontūro hidrauliniams pasipriešinimams nugalėti ir tekėjimo greičiui w pasiekti (paprastai ne didesniam kaip 0,2 m/s).

Esant priverstinei cirkuliacijai, šilumokaičio nebūtina įrengti aukščiau. Be to, gali būti didesni skysčių greičiai, todėl galima imti mažesnio skersmens vamzdžius, intensyvesnis yra šilumos atidavimas. Tačiau šiuo atveju reikia siurblio *3*.

Taikant vonios būdą, fluidas šildomas pačiame šilumokaičio apvalkale degimo dujomis, garais, elektra ir kt. Skysčio šildymo degimo dujomis schema parodyta 13.6 pav. Vanduo, kuriuo šildoma, gali būti mažo, artimo atmosferos, didesnio už atmosferos ir didelio slėgio.



13.5 pav. Cirkuliacinio šildymo schema:
a – natūralioji cirkuliacija,
b – priverstinė cirkuliacija



13.6 pav. Voninio šildymo schema:
1 – plėtimosi indas, *2* – virimo katilas,
3 – apvalkalas, *4* – kūrykla,
5 – rezervuaras, *6* – siurblys

Mažo slėgio vandeniu šildomos patalpos, taip pat toks vanduo naudojamas medžiagoms šildyti iki neaukštos temperatūros (iki 130 °C). Vanduo,

kaip šildantysis fluidas, pašildomas specialiuose katiluose dūmais arba panaudotais garais atitinkamuose šilumokaičiuose, kurie vadinami boileriais (iki 130...150 °C).

Norint gauti aukštesnę šildymo temperatūrą (200...370 °C), šildoma didesnio arba didelio slėgio vandeniu (iki 22,1 MPa).

Tepalais šildoma (iki 250...300 °C temperatūros), kai negalima šildyti vandeniu ir vandens garais dėl jų didelio slėgio. Tepalo šilumos atidavimo koeficientas α mažesnis negu vandens.

Kaip minėta anksčiau, difenilo mišinys, kaip šildantysis fluidas, plačiai naudojamas, kai medžiagą reikia įkaitinti iki 260...400 °C temperatūros. Esant atmosferos slėgiui, pasiekiama 258 °C temperatūra. Šio būdo teigiama savybė yra tai, kad, esant mažam slėgiui, gaunama didelė kaitinimo temperatūra.

Natūraliai cirkuliuojančio difenilo mišinio šilumos atidavimo koeficientas $\alpha = 200...350$ W/(m^2·K); jeigu cirkuliacija priverstinė ir srovės greitis $w = 1,5...2,8$ m/s, tai $\alpha = (1,3...2,14)\cdot 10^3$ W/(m^2·K).

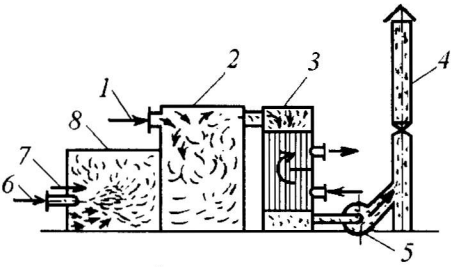
Iš druskų tirpalų šildymui naudojami šie: 1) 50 % $NaNO_2$ ir 50 % KNO_3 tirpalas; 2) 40 % $NaNO_2$, 7 % $NaNO_3$ ir 53 % KNO_3 tirpalas. Jų sudėtis nurodyta masės procentais. Normaliosiomis sąlygomis šios druskos esti kietos. Iš jų ir karšto (60 °C) vandens paruošiamas 80 % koncentracijos tirpalas. Pirmuoju tirpalu kaitinama iki 450 °C, antruoju – iki 540 °C temperatūros. Aukštesnėje temperatūroje šie tirpalai suskyla. Esant 400 °C temperatūrai ir srovės greičiui $w = 0,9$ m/s, šių tirpalų šilumos atidavimo koeficientas $\alpha = 4,86\cdot 10^3$ W/(m^2·K).

Kad būtų galima kaitinti iki aukštos temperatūros ir intensyviau perduoti šilumą, šilumokaičiuose plačiau pradėta naudoti skystus metalus: švinį, bismutą, kadmį, stibį, alavą, natrį, kalį ir jų lydinius. Ypač perspektyvus fluidas yra natris, turintis didelį šilumos atidavimo koeficientą (kai $w = 3$ m/s, $\alpha = 36,3\cdot 10^3$ W/(m^2·K)). Didžiausias natrio trūkumas yra tai, kad jis aktyviai reaguoja su vandeniu (gali užsidegti ir sprogti).

Šildymas dujomis. Medžiagoms kaitinti iki aukštos temperatūros (800...1000 °C) šildytuvuose dažnai vartojamos degimo dujos. Jos, kaip šilumnešis, turi trūkumų: labai mažas jų šilumos atidavimo koeficientas α, maža savitoji šiluma – $c_p = 1,5$ kJ/(m^3·K). Todėl gana didelis dujų debitas, sunku reguliuoti kaitinimą, užsiteršia šildomieji paviršiai (netiesiogiai kaitinant) arba kaitinamoji medžiaga (tiesiogiai kaitinant).

Šildančiosios degimo dujos gaunamos prie šildytuvo įrengtoje specialioje kuro deginimo kameroje – kūrykloje. Be to, ekonominiais sumetimais pirmiausia panaudojamos jau vartotos, t. y. iš krosnių, katilų ir kt. išmetamos dujos.

Šildymo dujomis schema pateikta 13.7 pav. Dujų, kaip šildančiojo fluido, temperatūra reguliuojama keičiant į maišymo kamerą *2* tiekiamo oro kiekį.



13.7 pav. Šildymo dujomis schema:
1 – oro tiekimas į kamerą, *2* – maišymo kamera, *3* – šilumokaitis – garo katilas, *4* – kaminas, *5* – dūmsiurbis, *6, 7* – kuro ir oro tiekimas, *8* – kūrykla

Kiek per sekundę reikia sudeginti kuro, galima apskaičiuoti iš šios lygties:

$$B = \frac{Q + Q_n}{h_1 - h_2}; \qquad (13.2)$$

čia B – per sekundę sudeginamo kuro kiekis, kg/s; Q – šildytuvo našumas, kW; Q_n – šilumos nuostoliai į aplinką, kW; h_1 – į šildytuvą įtekančių dujų entalpija, kJ/kg (kJ/nm^3); h_2 – iš šildytuvo ištekančių dujų entalpija, kJ/kg (kJ/nm^3); indeksas n rodo, kad skaičiavimai atliekami normaliosiomis sąlygomis, t. y. esant 0 °C temperatūrai ir 760 mm Hg slėgiui.

Reikalingas degimo kameros tūris apskaičiuojamas taip:

$$V = \frac{Q_ž \cdot B}{q_v}; \qquad (13.3)$$

čia $Q_ž$ – kuro žemutinė degimo šiluma, kJ/kg, (kJ/nm^3); q_v = *150...350* kW/m^3 – tūrinis šiluminis degimo intensyvumas kameroje. Jis parenkamas pagal kuro rūšį ir kūryklos tipą.

Dujinio kuro degimo šilumą, kJ/nm^3, galima apskaičiuoti pagal lygtį

$$Q_ž = 126{,}4\ CO + 358\ CH_4 + 560\ C_2H_2 + 591\ C_2H_4 + 633\ C_2H_6 + \\ + 912\ C_3H_8 + 1403\ C_6H_6 + 234\ H_2S + 108\ H_2, \qquad (13.4)$$

o skystojo ir kietojo kuro degimo šilumą, kJ/kg, – taip:

$$Q_ž = 339\ C + 1035\ H - 109\ (O–S) - 25\ W. \qquad (13.5)$$

Šiose lygtyse elementų bei junginių kiekiai išreikšti procentais; W – kuro drėgmė, %.

Šildymas elektra. Elektros energija plačiai naudojama chemijos pramonėje įvairioms medžiagoms šildyti, išdeginti, išlydyti ir kt. Pažymėtini šie šildymo būdai: varžinis, indukcinis aukštojo dažnio srovėmis ir elektros lanku.

Šildant varžiniu būdu, elektros srovė leidžiama per pačią kaitinamąją medžiagą arba per specialius kaitinimo elementus – varžas. Šiuo būdu kaitinama iki 1000...1100 °C temperatūros.

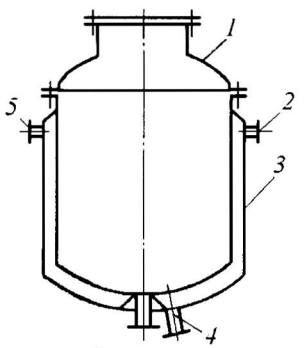
Šildant indukciniu būdu, šildytuvas apvyniojamas apvijomis; jomis leidžiant kintamąją elektros srovę, aparato sienelėse indukuojasi elektros srovė, todėl jos tolygiai šyla.

Šildant aukštojo dažnio srovėmis, šiluma skiriasi pačioje šildomojoje medžiagoje. Aukštojo dažnio srovė per kondensatorių perduodama dielektrinei kaitinamajai medžiagai. Joje dalis energijos sunaudojama nugalėti trinčiai tarp molekulių ir virsta šiluma. Šiuo būdu visa medžiaga šildoma tolygiai, neperkaista jos atskiri sluoksniai. Labai lengva ir patogu reguliuoti šildymo temperatūrą.

Elektros lanku kaitinama iki 1500...2000 °C temperatūros. Kaitinti galima uždaruoju ir atviruoju lanku. Tačiau elektros lanku neįmanoma tolygiai įkaitinti medžiagos, be to, sunku tiksliai reguliuoti temperatūrą.

13.1.2. Šilumokaičiai

Šildytuvas yra toks šilumokaitis, kurio paskirtis pašildyti medžiagą iki reikiamos temperatūros. Chemijos pramonėje naudojami įvairių tipų ir rūšių šildytuvai. Jie, kaip šilumokaičiai, gali būti skirstomi pagal šildomojo paviršiaus formą, šildymo pobūdį, šildančiojo fluido, arba šildalo, rūšį ir kt.



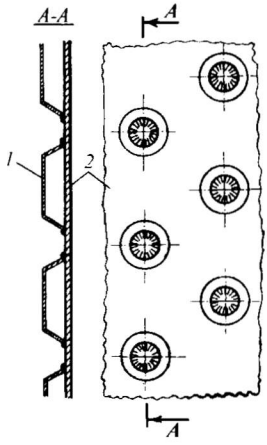
13.8. pav. Šildytuvas su paprastu apvalkalu:
1 – šildytuvo korpusas, *2* – garo tiekimo atvamzdis, *3* – apvalkalas, *4* – kondensato išleidimo atvamzdis, *5* – oro išleidimo atvamzdis

Pagal šildomojo paviršiaus formą šildytuvai skirstomi į apvalkalinius, vamzdinius, kanalinius, plokštinius, blokinius, elementinius.

Apvalkaliniai šildytuvai esti įvairių konstrukcijų: su paprastu apvalkalu, su sustiprintu apvalkalu, su specialiais apvalkalais (su sienvamzdžiais, su pritvirtintais prie sienelės vamzdžiais bei kanalais).

Šildytuvo su paprastu apvalkalu schema pateikta 13.8 pav. Šildantysis fluidas čia teka tarp apvalkalo ir korpuso, o šildomasis fluidas yra korpuse.

Apvalkalas prie korpuso privirinamas arba varžtais priveržiamas prie jo flanšo. Toks paprastas apvalkalas naudojamas, esant nedideliam šildančiojo fluido slėgiui (0,6...1,0 MPa). Kad būtų geriau perduodama šiluma, korpuse esantis šildomasis fluidas gali būti maišomas. Skaičiuojant apytiksliai, galima imti tokias šilumos perdavimo koeficiento vertes:

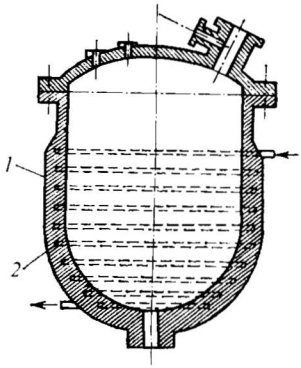


13.9 pav. Šildytuvas su sustiprintu apvalkalu:
1 – apvalkalo sienelė,
2 – šildytuvo sienelė

- šildant garais nemaišomą vandenį, k = 290...1220 W/(m2·K);
- šildant garais nemaišomą tepalą, k = 58...170 W/(m2·K);
- šildant garais nemaišomą verdantį vandenį, k = *1400...2090* W/(m^2·K).

Jeigu slėgis siekia iki 7,5 MPa, gali būti naudojami *šildytuvai su sustiprintu apvalkalu.* Skylių, išštampuotų apvalkale, kraštai privirinami prie šildytuvo sienelių (13.9 pav.), todėl padidėja apvalkalo mechaninis stiprumas ir šildančiojo fluido turbulizacija. Kartu padidėja ir šilumos atidavimo koeficientas: *k* yra 50...70 % didesnis negu esant paprastam apvalkalui.

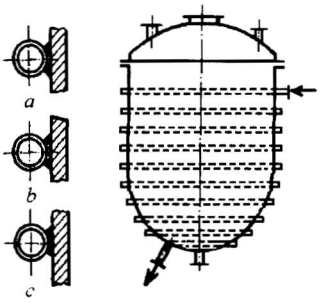
Vartojant didelio slėgio šildantįjį fluidą, paprasti apvalkalai netinka, nes jų sienelės būtų labai storos, o konstrukcija neekonomiška. Šiuo atveju daromas *specialus apvalkalas.* Jo konstrukcija gali būti labai įvairi. Pavyzdžiui, tokį apvalkalą gali sudaryti plieninių vamzdžių spiralės, įlietos į pastorintas šildytuvo sieneles (13.10 pav.). Šiais vamzdžiais teka didelio slėgio šildalas (garai ar skystis). Didžiausias tokios konstrukcijos trūkumas yra tai, kad tokį apvalkalą sunkoka pagaminti; be to, plieno ir ketaus šiluminio plėtimosi koeficientai nevienodi, todėl atskirose vietose tarp vamzdžių ir korpuso sienelių dažnai susidaro tarpai ir dėl to blogiau perduodama šiluma.



13.10 pav. Šildytuvas su į sieneles įlietais vamzdžiais:
1 – šildytuvo sienelė, *2* – vamzdis

Dažnai naudojami šildytuvai, kurių korpusas apjuostas *spiralės formos vamzdžiais*, pritvirtintais prie korpuso (13.11 pav.). Vamzdžiai pritvirtinami prie sienelės, tarpas tarp jų ir sienelės pripildomas privirinamojo (*a*) arba kito metalo ir užvirinamas (*b*); be to, vamzdžiai prie sienelės gali būti prilituoti (*c*).

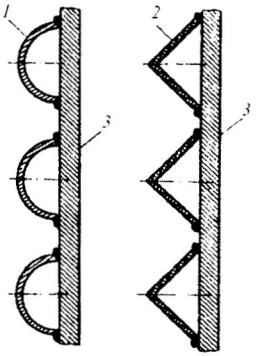
Šios konstrukcijos gerosios savybės: korpusas ir vamzdžiai gali būti daromi iš skirtingų metalų, vamzdžių sistemą galima skirstyti į keletą sekcijų, maitinamų nepriklausomai viena nuo kitos. Tokios konstrukcijos šildytuvai gali būti naudojami, kai slėgis siekia iki 25,0 MPa.



13.11 pav. Šildytuvas su prie sienelių pritvirtintais vamzdžiais: *a* – privirinti vamzdžiai, *b* – privirinti, pripildžius tarpą tarp vamzdžio ir sienelės kito metalo, *c* – prilituoti vamzdžiai

Šilumos perdavimas priklauso ir nuo vamzdžių pritvirtinimo prie korpuso būdo. Šildant sočiuoju garu verdantį vandenį, $k = 1000$ W/(m^2·K) (jei korpuso sienelė nikeliuota).

Šildytuvai su prie sienelių pritvirtintais kanalais nuo ankstesnių konstrukcijų šildytuvų skiriasi tuo, kad prie jų korpuso sienelių pritvirtinami ne vamzdžiai, o apskritimo arba kitokio skerspjūvio kanalai (13.12 pav.).

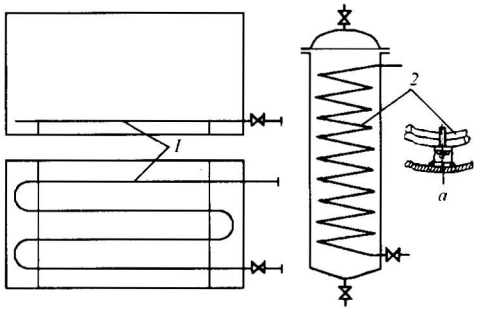


13.12 pav. Šildytuvas su prie sienelių pritvirtintais įvairios skerspjūvio formos kanalais: *1* – apskritimo formos kanalas, *2* – trikampis kanalas, *3* – šildytuvo sienelė

Šio tipo šildytuvai geri tuo, kad juose šildantysis fluidas liečiasi tiesiog su korpuso sienele, be to, kanalo spiralės tvirtinimo būdas neturi įtakos šilumos mainams. Tokie šildytuvai naudojami, kai šildalo slėgis siekia iki 6,0 MPa.

Orientacinės k vertės, šildant sočiuoju garu, yra šios:

- šildant neverdantį skystį, $k = 460...1500$ W/(m^2·K);
- šildant verdantį vandenį, $k = 900...2500$ W(m^2·K);
- šildant kitus verdančius skysčius, $k = 700...2300$ W/(m^2·K).



13.13 pav. Gyvatukinis šildytuvas: *1* – išlankstytas vamzdis – gyvatukas, *2* – spirale susuktas vamzdis; *a* – vamzdžio tvirtinimas prie sienelės

Vamzdiniai šildytuvai būna įvairių konstrukcijų. Plačiausiai naudojami gyvatukiniai šildytuvai, su briaunotais vamzdžiais, apvalkaliniai, korpusiniai ir kt.

Gyvatukinį šildytuvą (13.13 pav.) sudaro lankstytas arba spirale susuktas vamzdis. Gyvatuku teka šildantysis fluidas, o iš išorės jį plauna šildomasis fluidas. Iš teigiamų tokių šildytuvų savybių pažymėtina tai, kad čia gali būti didelis šildančiojo fluido slėgis, galima ekonomiškai panaudoti šildomuosius paviršius, nes paprastai visas gyvatukas būna paniręs į šildomąjį fluidą.Šilumos perdavimo koeficientas k būna tokio dydžio:

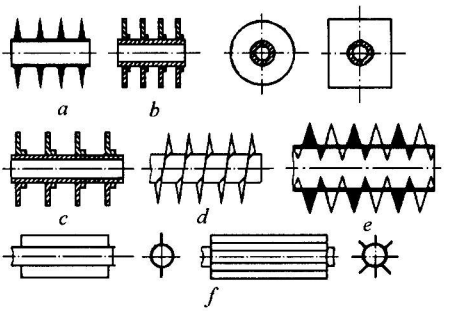
- šildant garu šildytuve esantį skystį, $k = 700...2300$ W/(m^2·K);
- šildant garu šildytuve verdantį vandenį, $k = 1700...3400$ W/(m^2·K).

Šildytuvai su briaunotais vamzdžiais naudojami, kai vieno iš fluidų yra gerokai mažesnis šilumos atidavimo koeficientas (dujos ir vanduo). Tokiu atveju tikslinga padidinti iš to fluido (dujų) pusės šildomąjį paviršių tiek kartų, kiek kartų mažesnis yra šio fluido šilumos atidavimo koeficientas α. Paviršius didinamas briaunomis (iki 10...20 kartų). Briaunos gali būti skersinės arba išilginės (13.14 pav.). Jas galima pripresuoti arba privirinti. Kad šildytuvas būtų reikiamo našumo, tokie briaunoti vamzdžiai surenkami į sekcijas. Briaunotieji šildytuvai dažnai dar vadinami kaloriferiais (13.15 pav.).

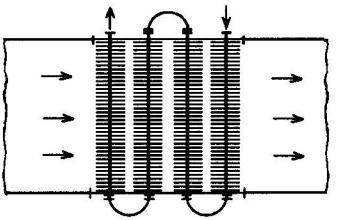
Išilginės briaunos paprastai daromos, kai fluidas teka išilgai vamzdžių. Kartais tokios briaunos būna abiejose vamzdžių pusėse. Briaunotojo šildytuvo šilumos perdavimo koeficientas apskaičiuojamas pagal suprastintą lygtį:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2} \cdot \frac{F_1}{F_2}}; \qquad (13.6)$$

čia F_1 – lygusis vamzdžio paviršius, m^2; F_2 – briaunotasis vamzdžio paviršius.



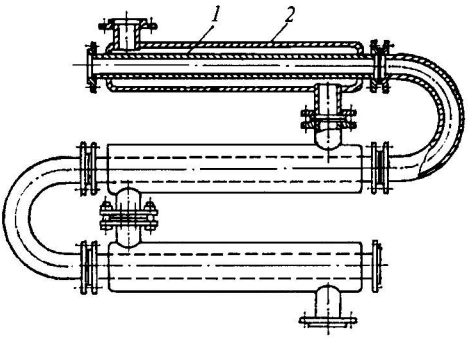
13.14 pav. Vamzdžių briaunos: *a* – lietos, *b* – lituotos, *c* – presuotos, *d* – vyniotos, *e* – spyglinės, *f* – išilginės



13.15 pav. Briaunotųjų vamzdžių šildytuvas

Apytikslės koeficiento k vertės: kai vamzdžiais teka šildantysis fluidas (garas arba karštas vanduo), o šildomosios dujos natūraliai cirkuliuoja, apiplaudamos briaunotus vamzdžius, $k = 5...11$ W/(m^2·K); esant priverstiniam dujų tekėjimui, $k = 11...46$ W/(m^2·K).

Vamzdiniai apvalkaliniai šildytuvai taip pat gali būti įvairių konstrukcijų. Vienas iš jų – „*vamzdis vamzdyje*“ parodytas 13.16 pav. Dėl didesnių fluidų greičių tokiuose šildytuvuose geresnės ir šilumos perdavimo sąlygos.



13.16 pav. „*Vamzdis vamzdyje*“ konstrukcijos šildytuvas: *1* – vidinis vamzdis, *2* – vamzdinis gaubtas

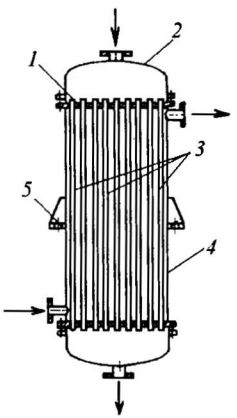
Vamzdžiai sujungti nuosekliai alkūnėmis. Jas nuėmus, vamzdžius galima išvalyti. Taip pat nuosekliai sujungti yra ir išoriniai vamzdžiai – gaubtai.

Šiems šilumokaičiams gaminti sunaudojama gana daug metalo. Be to, jie yra nekompaktiški. Šildant skysčiu skystį, tokių šildytuvų orientacinės šilumos perdavimo koeficientų vertės yra 350...1400 W/(m^2·K).

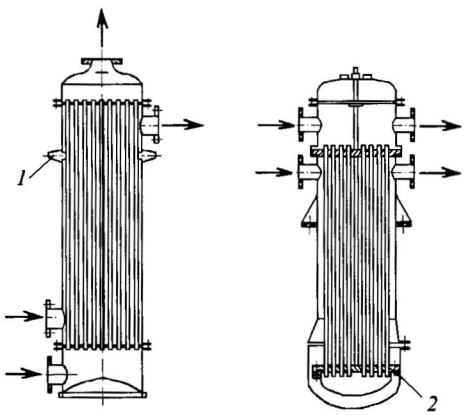
Apvalkaliniai šildytuvai yra plačiausiai naudojami. Tai vamzdžių pluoštas iš geležies lakštų suvirintame cilindriniame apvalkale. Vamzdžių galai įtvirtinti rėtinėse plokštėse. Jeigu apvalkalo ir vamzdžių temperatūrų skirtumas ne didesnis kaip 50 °C ir vamzdžiai nedaug ištįsta (13.17 pav.), prie apvalkalo pritvirtinamos abi rėtinės plokštės.

Jeigu temperatūrų skirtumas didesnis ir šildytuvai ilgesni, reikia arba apvalkale įtaisyti kompensatorių, arba pastoviai įtvirtinti tik vieną rėtinę plokštę (13.18 pav.), arba panaudoti lenktus vamzdžius (13.19 pav.).

Šio tipo šildytuvai gali būti statomi vertikaliai (13.19 pav., *b*) arba horizontaliai (13.19 pav., *a*). Kaip šildytuvuose teka fluidai, matyti jų paveiksluose. Kad fluidai greičiau tekėtų, ertmėje tarp vamzdžių daromos pertvaros (13.18 ir 13.19 pav.).



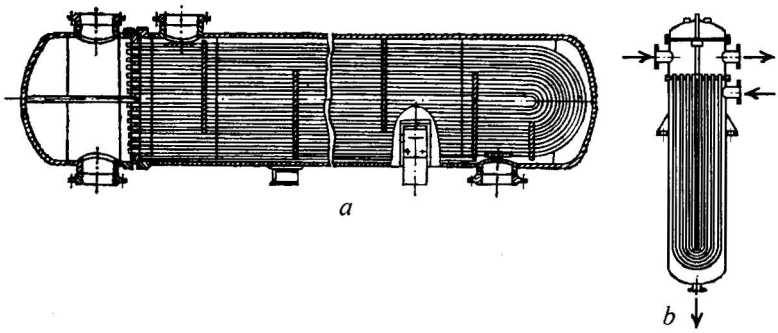
13.17 pav. Tiesių vamzdžių vertikalusis apvalkalinis šildytuvas: *1* – rėtinė plokštė, *2* – dangtis, *3* – vamzdžių pluoštas, *4* – apvalkalas, *5* – atrama



13.18 pav. Apvalkaliniai šildytuvai: *1* – kompensatorius, *2* – laisvoji rėtinė plokštė

Apvalkaliniuose šildytuvuose naudojami įvairūs fluidai ir įvairūs slėgiai (1...30 MPa). Šilumos perdavimo koeficientas k apskaičiuojamas kiekvienu konkrečiu atveju, pasinaudojant 12.1.4 poskyryje pateiktomis lygtimis. Esant normalioms darbo sąlygoms, tokio tipų šildytuvų orientacinės k vertės nurodytos 13.1 lentelėje.

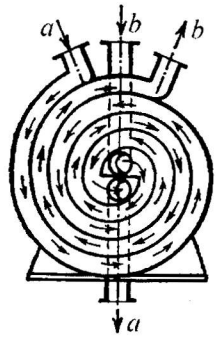
Apvalkaliniai šildytuvai plačiai naudojami cheminėje technologijoje, nes yra kompaktiški, jiems reikia palyginti mažai metalo, vamzdžius patogu išvalyti iš vidaus. Iš trūkumų paminėtini šie: sunku pasiekti didelius fluidų tekėjimo greičius, nepatogu vamzdžius valyti iš išorės, sunku gaminti juos iš tų metalų, kurie sunkiai valcuojami arba suvirinami.



13.19 pav. Lenktų vamzdžių apvalkalinis šildytuvas: *a* – horizontalusis, *b* – vertikalusis

13.1 lentelė. Orientacinės apvalkalinių šilumokaičių šilumos perdavimo koeficiento *k* vertės

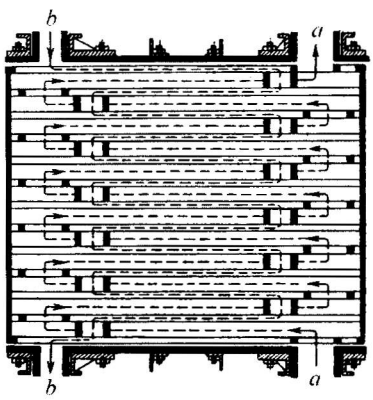
Šildantysis fluidas	Šildomasis fluidas	*k*, W/(m²·K)	
		natūralus judėjimas	priverstinis judėjimas
Vanduo	Vanduo	140...150	850...1750
Tepalas	Tepalas	29...58	120...290
Besikondensuojantys garai	Vanduo	200...1100	850...4500
Besikondensuojantys garai	Tepalas	58...170	120...350
Organinių junginių besikondensuojantys garai	Vanduo	230...460	350...840
Besikondensuojantys garai	Oras	6...12	12...58
Besikondensuojantys garai	Verdantis vanduo	–	1700...4700



13.20 pav. Spiralinis šildytuvas: *a* – šildantysis fluidas, *b* – šildomasis fluidas

Spiralinius šildytuvus sudaro spirale susukti stačiakampio skerspjūvio kanalai (13.20 pav.). Jais teka šildantysis (*a*) ir šildomasis *(b)* fluidas. Iš šonų kanalai uždengiami dangčiais. Tokie šildytuvai gali būti vertikalūs ir horizontalūs. Jie naudojami ten, kur būtinas didelis fluidų tekėjimo greitis. Ir dideliu greičiu tekant fluidams šiuose šildytuvuose hidrauliniai pasipriešinimai būna mažesni negu apvalkaliniuose. Tačiau juos daug sunkiau pagaminti, jie mechaniškai nestiprūs, negali būti naudojami, kai slėgiai didesni kaip 1,0 MPa. Orientacinės šilumos perdavimo koeficiento vertės: kai abu flui-

dai skysčiai, k = *700...2300* W/(m^2·K), kai šildantysis fluidas yra besikondensuojantys garai, o šildomasis – skystis, k = *2000* W/ (m^2·K).

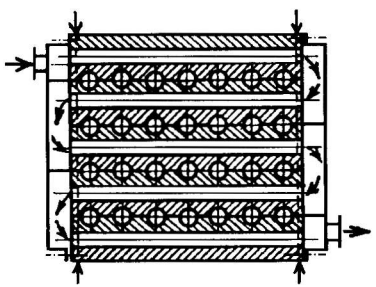


13.21 pav. Plokštinis šildytuvas:
a – šildantysis fluidas,
b – šildomasis fluidas

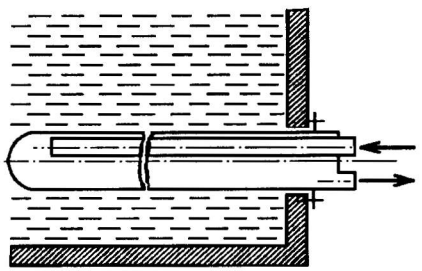
Plokštiniai šildytuvai sudaryti iš lygiagrečių plonos skardos plokštelių. Šios plokštelės sugrupuotos taip, kad susidarytų kanalai šildomajam (*b*) ir šildančiajam (*a*) fluidams tekėti. Principinė plokštinio šildytuvo schema parodyta 13.21 pav. Šie šildytuvai labai kompaktiški. Kadangi tarp plokštelių yra maži tarpeliai, tai fluidai įgyja didelius greičius ir susidaro geros šilumos perdavimo sąlygos.

Iš trūkumų paminėtina tai, kad jie netinka didesniam slėgiui, sunku pasiekti tokį kanalų sandarumą, kad nesimaišytų fluidai. Plokštiniai šildytuvai dažniausiai naudojami orui šildyti degimo dujomis, esant atmosferos slėgiui.Skysčiai šildomi filtrpreso tipo plokštiniuose šildytuvuose. Tokius plokštinius šildytuvus galima naudoti iki 1,0 MPa slėgio. Jų didelis šilumos perdavimo koeficientas, jie labai kompaktiški, juos lengva išardyti ir išvalyti. Didžiausias trūkumas – daug sujungimų, sandarinamų tarpikliais.

Blokiniai šildytuvai surenkami iš atitinkamo profilio plokščių. Jas suglaudus, susidaro kanalai šildančiajam ir šildomajam fluidams tekėti. Plokštės suveržiamos į bendrą bloką varžtais (13.22 pav.). Blokiniai šildytuvai paprastai gaminami iš antikorozinės medžiagos ir naudojami tuomet, kai šilumnešis yra agresyvus ir ne didesnio kaip 0,3...0,5 MPa slėgio.



13.22 pav. Blokinis šildytuvas



13.23 pav. Elementinis šildytuvas

Ypač agresyvioms medžiagoms (pvz., druskos rūgščiai, praskiestai sieros sieros rūgščiai, fosforo rūgščiai) šildyti naudojami blokiniai šildytuvai, pagaminti iš grafito, prisotinto fenolformaldehidinės dervos. Tokio grafito šiluminio laidžio koeficientas $\lambda = 92...116$ W/(m·K). Orientacinis šilumos perdavimo koeficientas, šildant garu vandenį, $k = 2200...2300$ W/(m^2·K).

Elementinio šildytuvo schema pateikta 13.23 paveiksle. Inde, kuriame yra šildomasis fluidas, įmontuoti šildymo elementai. Į juos tiekiamas šildantysis fluidas: garas, tepalas, verdantis skystis, elektra. Tokie elementai įmontuojami indo sienelėse arba jo dugne. Jų esti įvairių konstrukcijų. Ypač perspektyvūs ir patogūs yra elektriniai kaitinimo elementai, nes jais lengva reguliuoti kaitinimo intensyvumą.

13.1.3. Šilumokaičių skaičiavimas

Šilumokaičių skaičiavimas gali būti projektinis ir patikrinamasis. Atliekant projektinį naujo šilumokaičio skaičiavimą, kai žinomos šildytuvo darbo sąlygos, t. y. tekančių fluidų debitai ir jų temperatūros, svarbiausia yra nustatyti aparato šildomojo paviršiaus plotą.

Patikrinamasis skaičiavimas atliekamas jau pagamintų standartinių šilumokaičių: nustatomos jų optimalaus darbo sąlygos. Šiuo atveju aparato matmenys ir šildomojo paviršiaus plotas yra žinomi, o reikia nustatyti jo temperatūrinį režimą ir tekančių fluidų kiekius.

Kad būtų galima atlikti šilumokaičio projektinį skaičiavimą, turi būti žinoma: šilumnešiai, jų fizikiniai parametrai, debitas arba aparato našumas, šildymo temperatūra, taip pat preliminarūs aparato konstrukcijos duomenys.

Visus skaičiavimus galima suskirstyti į tris viena su kita susijusias grupes: šiluminius, konstrukcinius ir hidromechaninius.

Šiluminiai skaičiavimai atliekami siekiant nustatyti aparato šildomojo paviršiaus plotą F, kuris paprastai apskaičiuojamas pagal (12.182) šilumos perdavimo lygtį. Jei $d_2/d_1 < 1,5$, į šią lygtį įeinantis šilumos perdavimo koeficientas skaičiuojamas kaip plokščios sienelės; čia d_2, d_1 – vamzdžio išorinis ir vidinis skersmenys:

$$F = \frac{Q}{\Delta t \cdot k}.$$

Aparato šiluminis našumas, kai žinomas fluido debitas, apskaičiuojamas pagal lygtį

$$Q = G_1 \cdot c_1 \cdot (t_1' - t_1'') = G_2 \cdot c_2 \cdot (t_2'' - t_2').$$

Temperatūrų skirtumas Δt apskaičiuojamas pasirinkus fluidų srautų išdėstymą, atitinkamai iš (12.224), (12.226), (12.227) lygčių, o šilumos perdavimo koeficientas k – iš (12.184), (12.187), (12.188) lygčių.

Konstrukcinis skaičiavimas. Konstrukciniu skaičiavimu siekiama nustatyti aparato ir jo detalių svarbiausius matmenis: apvalkalo skersmenį, vamzdžių skaičių ir jų ilgį, ėjų *(ėja – fluido kelias aparate nuo vieno posūkio iki kito)* skaičių ir kt. Šiuo atveju turi būti žinomi abiejų fluidų debitai, tekėjimo greičiai, šildomojo paviršiaus dydis, temperatūra, vamzdžių skersmenys.

Pirmiausia skaičiuojama ta aparato dalis, kuri liečiasi su šildančiuoju fluidu). Žinant debitą G_1, apskaičiuojamas tekamasis skerspjūvio plotas:

$$f_1 = \frac{V_1}{w_1} = \frac{G_1}{\rho_1 \cdot w_1}; \qquad (13.7)$$

čia f_1 – tekamasis skerspjūvio plotas, m^2; V_1 – per sekundę pratekančio fluido tūris, m^3/s; w – fluido greitis, m/s; ρ – vidutinis fluido tankis, kg/m^3, G_1 – debitas, kg/s.

Vienos ėjos vamzdžių skaičių z_1 galima nustatyti iš šios lygties:

$$f_1 = \frac{\pi \cdot d_1^2}{4} \cdot z_1 .$$

Iš jos:

$$z_1 = \frac{4 \cdot f_1}{\pi \cdot d_1^2}; \qquad (13.8)$$

čia z_1 – vienos ėjos vamzdžių skaičius; d_1 – vidinis vamzdžių skersmuo.

Šildomojo paviršiaus plotas apskaičiuojamas pagal lygtį

$$F = \pi \cdot d_s \cdot L_1 \cdot z_1; \qquad (13.9)$$

čia F – šildomojo paviršiaus plotas, m^2; d_s – skaičiuojamasis vamzdžių skersmuo, m; jeigu $\alpha_1 \approx \alpha_2$, tai $d_s = 0{,}5 \cdot (d_1 + d_2)$; jeigu $\alpha_1 \geq \alpha_2$, tai $d_s = d_2$; jeigu $\alpha_1 \leq \alpha_2$, tai $d_s = d_1$; d_2 ir d_1 – vamzdžio išorinis ir vidinis skersmenys, m; α_1 ir α_2 – fluido ir vidinio vamzdžio sienelės paviršiaus bei fluido ir išorinio vamzdžio sienelės paviršiaus šilumos atidavimo koeficientai.

Iš čia vamzdžių ilgis

$$L_1 = F/(\pi \cdot d_s \cdot z_1). \qquad (13.10)$$

Paprastai šilumokaičiuose naudojami 3...4 m ilgio vamzdžiai. Jeigu skaičiuojant L_1 gaunamas didesnis, reikia didinti vamzdžių skersmenį arba ėjų skaičių. Tik esant dideliems šildomiesiems paviršiams ($F > 300$ m^2), vamzdžius galima imti 6...7 m ilgio.

Žinant standarto leidžiamą vamzdžių pluošto ilgį, galima nustatyti ėjų skaičių:

$$e_l = L_l / L\,; \qquad (13.11)$$

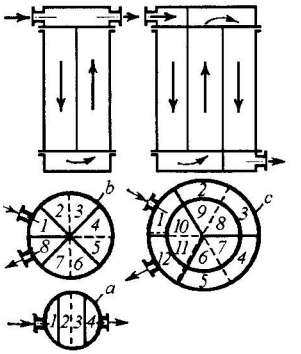
čia L – standarto leidžiamas vamzdžio ilgis, m.

Daugiaėjuose aparatuose rekomenduojamas lyginis ėjų skaičius. Tokio aparato konstrukcija yra paprastesnė, o atvamzdžiai tik viename gale. Pertvaros šilumokaičio galvutėse (13.24 pav.) gali būti lygiagrečiosios (*a*), radialiosios (*b*), lankinės (*c*) ir mišriosios.

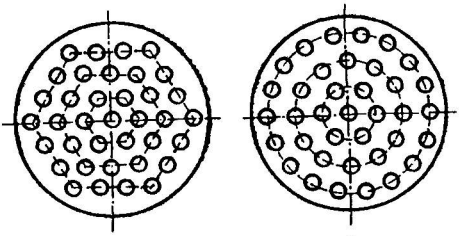
Bendras vamzdžių skaičius aparate

$$z = e_l \cdot z_l\,. \qquad (13.12)$$

Nustačius vamzdžių skaičių, sprendžiama, kaip jie turi būti išdėstyti. Vamzdžiai rėtinėje plokštėje įtvirtinami taip, kad įrenginys būtų kiek galima kompaktiškesnis, t. y. mažiausias būtų rėtinės plokštės ir apvalkalo skersmuo ir kuo mažesnis tarpvamzdinės ertmės skerspjūvio plotas. Mažinant šį skerspjūvį, didėja fluido greitis, o kartu ir šilumos perdavimo koeficientas k.



13.24 pav. Pertvaros ir jų išdėstymo šilumokaičiuose schemos: *a* – lygiagrečiosios, *b* – radialiosios, *c* – lankinės ir mišriosios



13.25 pav. Vamzdžių išdėstymo šilumokaičiuose schemos: *a* – taisyklingais šešiakampiais, *b* – apskritimais

Kita vertus, rėtinė plokštė turi būti pakankamai stipri, kad joje būtų galima sandariai įtvirtinti vamzdžius. Taip pat reikia siekti, kad aparatą būtų patogu gaminti ir remontuoti.

Tenkinant šiuos reikalavimus, vamzdžiai dėstomi bendraašių taisyklingų daugiakampių arba apskritimų periferijose (13.25 pav.). Dažniausiai naudojamas pirmasis būdas. Paprastai vamzdžiai sudaro taisyklingus šešiakampius. Šiuo atveju vamzdžių skaičius

$$z = 3a \cdot (a-1) + 1\,, \qquad (13.13)$$

kur a – didžiausio šešiakampio kraštinėje esančių vamzdžių skaičius, arba

$$z = \frac{3}{4} \cdot (b^2 - 1) + 1; \qquad (13.14)$$

čia b – didžiausio šešiakampio įstrižainėje esančių vamzdžių skaičius.

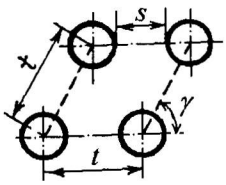
Jeigu vamzdžiai sudaro keturkampį, $b = a$. Tada

$$z = a^2. \qquad (13.15)$$

Dėstant vamzdžius bendraašiais apskritimais (13.25 pav., *b*), kiekviename apskritime vamzdžių skaičius apskaičiuojamas pagal lygtį

$$z_x = 2 \cdot \pi \cdot x; \qquad (13.16)$$

čia x – apskritimo eilės numeris. Jeigu $x = 3$, tai $z_3 = 2 \cdot 3{,}14 \cdot 3 = 18{,}84 \approx 18$ (apvalinama iki artimiausios mažesnės vertės).



13.26 pav. Vamzdžių išdėstymo rėtinėse plokštėse schema: t – žingsnis, s – atstumas tarp vamzdžių

Kiekvienoje apskritiminėje eilėje žingsnis tarp vamzdžių kitoks, todėl aparatą nepatogu gaminti.

Pagal standarto normas, kai $d_2 = 25...57$ mm, žingsnis t ir atstumas s tarp vamzdžių (13.26 pav.), įvalcuojamų į plienines rėtines plokštes, parenkami laikantis šių sąlygų:

$$t/d_2 = \beta = 1{,}23...1{,}56; \qquad (13.17)$$

$$s = t - d_2 = 7...13. \qquad (13.18)$$

Apvalkalo skersmuo D (vidinis) nustatomas pagal aktyvųjį rėtinės plokštės plotą F_a:

$$F_a = \pi \cdot D^2/4; \qquad D = \sqrt{\frac{4F_a}{\pi}}. \qquad (13.19)$$

Aktyvųjį rėtinės plokštės plotą sudaro vamzdžių užimamas plotas F_n ir laisvasis rėtinės plokštės plotas F_l:

$$F_a = F_n + F_l. \qquad (13.20)$$

Tačiau

$$F_n = z \cdot F_0; \qquad (13.21)$$

čia F_0 – vienam vamzdžiui reikalingas plotas:

$$F_0 = t^2 \cdot \sin\gamma. \qquad (13.22)$$

Laisvąjį rėtinės plokštės plotą sudaro už vamzdžių pluošto esanti periferinė jos dalis ir pertvarų užimama dalis:

$$F_l = (0,1...0,5)\cdot F_n. \tag{13.23}$$

Išreiškę $F_n/(F_n + F_l) = \varphi$, t. y. rėtinės plokštės pripildymo koeficientu, gauname:

$$F_a = \frac{F_n}{\varphi} = \frac{z\cdot t^2\cdot \sin\gamma}{\varphi}. \tag{13.24}$$

Vienos ėjos šilumokaičio $\varphi = 0,8...0,9$, daugiaėjo $\varphi = 0,6...0,8$.

Mažesnės vertės tinka didesnio ėjų ir mažesnio vamzdžių skaičiaus šilumokaičiams. φ sumažinamas 5...10 %, kai vamzdžiai montuojami apskritimu, ir 15 % – kai kvadratais.

Įrašę į (13.19) lygtį F_a vertę, gauname:

$$D = 1,13\cdot\beta\cdot d_2\cdot\sqrt{\frac{z}{\varphi}\cdot\sin\gamma}. \tag{13.25}$$

Kai $d_s = d_2$, plotas $F = z\cdot\pi\cdot d_s\cdot L$. Tuomet

$$D = 0,635\cdot\beta\cdot\sqrt{\frac{F\cdot d_2}{L\cdot\varphi}}. \tag{13.26}$$

Tarpvamzdinės dalies skaičiavimas. Jeigu fluido fazinė būsena nesikeičia, tai jam tekėti reikalingas plotas randamas taip:

$$f_2 = \frac{V_2}{w_2} = \frac{G_2}{\rho_2\cdot w_2}; \tag{13.27}$$

čia f_2 – vienos ėjos skerspjūvio plotas, m^2; G_2 – šildomojo fluido debitas, kg/s; w_2 – fluido greitis, m/s; ρ_2 – vidutinis fluido tankis, kg/m^3; V – per sekundę pratekančio fluido tūris, m^3/s.

Tekant fluidui išilgai vamzdžių, tekamasis plotas gali būti skaičiuojamas iš lygties:

$$f_2 = z\cdot\left(\frac{t^2\cdot\sin\gamma}{\varphi} - \frac{\pi\cdot d^2}{4}\right), \tag{13.28}$$

arba

$$f_2 = F_p\cdot(1-x); \tag{13.29}$$

čia F_p – visas aparato skerspjūvio plotas srautui statmena kryptimi; x – pripildymo koeficientas, rodantis, kokią dalį skerspjūvio ploto užima vamzdžiai.

Kai srautas teka *išilgai* vamzdžių, pripildymo koeficientas

$$x_{iš} = \frac{\pi \cdot \varphi}{4 \cdot \beta^2 \cdot \sin\gamma}. \qquad (13.30)$$

Paprastai $x_{iš} = 0{,}4...0{,}5$.

Jei išilginis srautas yra vienos ėjos, tai tekamąjį skerspjūvį galima apskaičiuoti taip:

$$f_2 = \pi \cdot \left(D^2 - z \cdot d_2^2\right)/4. \qquad (13.31)$$

Įrašę į (13.29) lygtį F_p ir x vertes, gauname:

$$f_2 = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot \left(1 - \frac{\pi \cdot \varphi}{4 \cdot \beta^2 \cdot \sin\gamma}\right). \qquad (13.32)$$

Jeigu tarpvamzdinėje ertmėje srautas teka *skersai* vamzdžių, tai

$$f_2 = D \cdot L - b \cdot d_2 \cdot L; \qquad (13.33)$$

čia b – vamzdžių skaičius periferinio šešiakampio įstrižainėje; l – vamzdžio ilgis.

Apytiksliai:

$$b \approx D/t = D/\left(\beta \cdot d_2\right); \quad f_2 = D \cdot L \cdot \left(1 - 1/\beta\right); \qquad (13.34)$$

tada

$$\beta = 1/x_{sk}.$$

Šilumokaičiuose srautui tekant skersai vamzdžių, pripildymo koeficientas $x_{sk} = 0{,}75...0{,}8$.

Ėjų skaičius tarpvamzdinėje ertmėje. Kai $V_1 = V_2$, šildomojo fluido greitis išilgai vamzdžių $w_2 \approx 0{,}7 \cdot w_1$, o kai $V_1 > V_2$, greitis w_2 dar mažesnis, dėl to mažesnis ir šilumos perdavimo koeficientas k. Kad būtų didesnis fluido greitis w_2, reikia didinti aparate ėjų tarp vamzdžių skaičių e_2. Atitinkamai parinkus w_2, ėjų skaičių e_2 galima nustatyti iš sąlygos

$$f_2 = \frac{V_2}{w_2} = \frac{\pi \cdot D^2}{4 \cdot e_2} \cdot \left(1 - x_{iš}\right); \qquad (13.35)$$

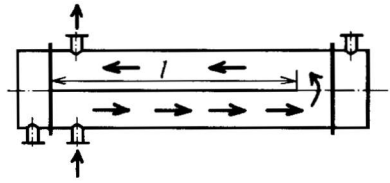
iš čia

$$e_2 = \frac{\pi \cdot D^2}{4 \cdot f_2} \cdot \left(1 - x_{iš}\right). \qquad (13.36)$$

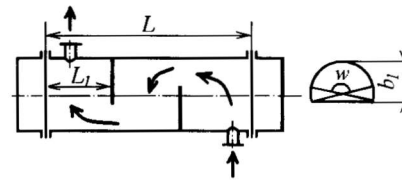
Tuomet išilginių pertvarų skaičius

$$p_2 = e_2 - 1. \tag{13.37}$$

Kad būtų patogiau aparatą prijungti prie vamzdžių, e_2 paprastai esti lyginis skaičius. Pertvarų ilgis l imamas toks, kad w_2 ir f_2 išliktų pastovūs.



13.27 pav. Išilginė pertvara, esant dviejų ėjų išilginiam vamzdžių aptekėjimui



13.28 pav. Skersinių pertvarų išdėstymo schema

Sudarius aparate dviejų ėjų išilginį vamzdžių aptekėjimą (13.27 pav.),

$$l = L - \frac{f_2}{D - b \cdot d_2}, \tag{13.38}$$

arba

$$l \approx L - \frac{f_2}{D \cdot (l - x_{sk})}; \tag{13.39}$$

čia b – vamzdžių skaičius rėtinės plokštės skersmens linijoje.

Skersinės pertvaros (13.28 pav.). Skersinio srauto tekamasis plotas

$$f_2' = \frac{L}{e_2} \cdot (D - b \cdot d_{iš}) = \frac{L \cdot D}{e_2} \cdot (l - x_{sk}). \tag{13.40}$$

Išilgai vamzdžių tekančio srauto tekamasis plotas posūkyje

$$f_2'' = F_p'' \cdot (l - x_{iš}) = \left(\frac{\pi \cdot D^2 \cdot w}{4360} - \frac{D^2}{8} \cdot \sin \omega \right) \cdot (l - x_{iš}). \tag{13.41}$$

Ėjų skaičius

$$e_2 = \frac{L}{D} \cdot (D - b \cdot d_2), \tag{13.42}$$

arba

$$e_2 = \frac{L \cdot D}{f_2} \cdot (l - x_{sk}). \tag{13.43}$$

Kad f_2' būtų lygus f_2'', reikia parinkti pertvaros plotį

$$b_1 = (0{,}6...0{,}8)\cdot D\,, \tag{13.44}$$

o paskui, naudojantis (13.40) ir (13.41) lygtimis, patikrinti plotus.

Hidromechaniniai skaičiavimai. Atliekant hidromechaninius skaičiavimus, nustatomas šilumokaičio hidraulinis pasipriešinimas Δp, kuris susidaro fluidui tekant aparatu. Nuo šio pasipriešinimo priklauso energijos, užtikrinančios fluido tekėjimą aparate, sąnaudos.

Hidraulinis pasipriešinimas Δp mažėja, mažėjant greičiui, bet kartu mažėja ir šilumos perdavimo koeficientas. Taigi tam pačiam šilumos kiekiui perduoti reikės didesnio šilumokaičio paviršiaus, vadinasi, padidės jo savikaina. Todėl greitis parenkamas atsižvelgiant į optimalias sąlygas, nuo kurių priklauso aparato savikaina ir eksploatacinės energijos sąnaudos.

Bendrą šilumokaičio hidraulinį pasipriešinimą sudaro pasipriešinimas dėl fluido trinties Δp_t; pasipriešinimas, susidarantis dėl vietinių kliūčių, Δp_{vk}; pasipriešinimas reikalingam fluido greičiui pasiekti (dinaminis) Δp_g. Visus šiuos pasipriešinimus galima apskaičiuoti pagal pirmosios knygos 6 dalyje pateiktas lygtis:

$$\Delta p = \Delta p_t + \Delta p_{vk} + \Delta p_g\,. \tag{13.45}$$

13.2. Aušinimas

Aušinimu vadinamas toks procesas, kai medžiagos temperatūra sumažinama ne daugiau kaip iki aplinkos temperatūros. Medžiagos aušinamos skysčiais, garais, dujomis. Iki 10...30 °C medžiagos dažniausiai aušinamos aplinkos vandeniu ir oru. Vanduo, kaip aušinantysis fluidas, arba aušalas, yra geresnis už orą, nes jo didesnė šiluminė talpa, didesnis šilumos atidavimo koeficientas, be to, juo medžiagas galima ataušinti iki mažesnės temperatūros.

Medžiagoms aušinti vanduo imamas iš natūralių vandens telkinių: upių, ežerų, tvenkinių ir kt. Rajonuose, kur trūksta vandens, įšilęs aušintuve vanduo neišmetamas, bet leidžiamas į specialius aušinimo įrenginius (baseinus, bokštus), o iš jų vėl grąžinamas į aušintuvą. Temperatūra, iki kurios galima ataušinti medžiagas, priklauso nuo aušinančiojo vandens temperatūros, o ši priklauso nuo vandens šaltinio temperatūros ir atmosferos sąlygų. Pavyzdžiui, upių, ežerų, tvenkinių vandens temperatūra būna 4...25 °C, artezinių gręžinių 8...15 °C, aušinimo bokštų vanduo 30 °C (vasarą).

Kad mažiau iš aušinančiojo vandens ant aušinimo paviršiaus nusėstų druskų, iš aušintuvo ištekančio vandens temperatūra turi būti ne didesnė kaip 40...50 °C.

Jei medžiagos temperatūra yra didesnė už aušalo virimo temperatūrą, tai, jai auštant, dalis aušalo išgaruos. Tokį aušinimo procesą įprasta vadinti *garinamuoju aušinimu*. Jam vykti mažiau reikia aušalo.

Nors aplinkos oro šiluminė talpa ir šilumos atidavimo koeficientas yra maži, bet jis gana plačiai naudojamas aušintuvuose, ypač ten, kur vanduo arba kiti skysčiai gali užšalti. Be to, oras dažniausiai naudojamas laistomuosiuose aušintuvuose. Šilumos atidavimo koeficientui padidinti aušintuvuose didinamas oro greitis ir iš oro pusės aušinimo paviršiai daromi ne lygūs, o briaunoti.

Aušinančiojo fluido kiekį galima apskaičiuoti taip pat kaip ir šildytuvų pagal šilumos balanso lygtį:

$$G_1 \cdot c_{p_1} \cdot (t_1' - t_1'') = G_2 \cdot c_{p_2} \cdot (t_2'' - t_2');$$

čia G_1, c_{p_1}, t_1', t_1'' – aušinamosios medžiagos debitas, kg/s, jos savitoji šiluma, kJ/(kg·K), į aušintuvą įtekančios ir iš jo ištekančios medžiagos temperatūra; G_2, c_{p_2}, t_2', t_2'' – aušinančiojo fluido (vandens, oro ir kt.) debitas, kg/s, jo savitoji šiluma, kJ/(kg·K), į aušintuvą įtekančio ir iš jo ištekančio aušinančiojo fluido temperatūra, °C. Tada

$$G_2 = \frac{G_1 \cdot c_{p_1}}{c_{p_2}} \cdot \frac{t_1' - t_1''}{t_2'' - t_2'}.$$

Kiekvienas šildytuvas yra šildančiojo fluido aušintuvas. Šildytuvai išnagrinėti 13.1 skyriuje. Jų bendrieji principai tinka ir aušintuvams, todėl šiame poskyryje jie nenagrinėjami.

13.3. Kondensacija

Bendrieji duomenys. Jei aušinamoji medžiaga yra garai, o aušalo temperatūra $t < t_{sg}$ (t_{sg} – sočiųjų garų temperatūra), tai garai aušdami virs skysčiu – kondensuosis. Taigi kondensacija yra tas pats aušinimo procesas, tik vykstantis tam tikromis sąlygomis.

Bet kokio skysčio perkaitintųjų garų temperatūra, kai garai aušinami pastoviame slėgyje, mažėja iki sočiųjų garų temperatūros. Atėmus tam tikrą kiekį šilumos, garuose atsiranda skysčio, sausieji garai virsta drėgnaisiais. Jeigu iš sausųjų garų atimsime visą garavimo šilumą r, tai jie visi virs skysčiu. Toks garų skystėjimo procesas vadinamas *kondensacija*. Garams kondensuoti įrengiami specialūs šilumokaičiai, vadinami *kondensatoriais*. Garai kondensatoriuose aušinami vandeniu, oru arba vandens ir oro mišiniu.

Kondensato tūris tūkstantį ir daugiau kartų mažesnis už garų tūrį. Todėl, kondensuojantis garams, kondensatoriuje susidaro vakuumas, kurio dydis priklauso nuo kondensacijos temperatūros, taigi ir nuo aušalo temperatūros.

Kondensuojantis garams, nesikondensuojančios dujos bei oras, kuris išsiskiria iš skysčio arba patenka pro nesandarumus iš aplinkos, kaupiasi kondensatoriuje ir mažina jame vakuumą. Todėl, norint išlaikyti pastovų vakuumą, reikia nuolat siurbti dujas iš kondensatoriaus. Tam prie kondensatoriaus visada įrengiamas dujų vakuuminis siurblys ir siurblys kondensatui šalinti.

Kondensatorius – šilumokaitis, kurio paskirtis yra kondensuoti garus. Atsižvelgiant į aušinimo būdą, kondensatoriai skirstomi į dvi grupes: į maišymosi kondensatorius ir paviršinius.

Kondensatoriai, kuriuose garai tiesiogiai liečiasi su aušalu, vadinami maišymosi kondensatoriais, o jeigu fluidai tiesiogiai nesiliečia (atskirti sienele), – paviršiniais.

13.3.1. Kondensatoriai

Maišymosi kondensatoriai. Juose su aušinančiuoju vandeniu tiesiogiai liečiasi garai ir maišosi garų kondensatas. Tokie kondensatoriai naudojami ten, kur kondensuojamieji garai yra beverčiai. Norint padidinti garų ir aušinančiojo vandens sąlyčio paviršių, vanduo ištaškomas garų ertmėje. Pagal fluidų tekėjimo kryptį maišymosi kondensatoriai skirstomi į pasrovinius ir priešsrovinius, o pagal tai, kaip šalinamas iš kondensatoriaus vanduo, – į šlapiuosius ir sausuosius.

Šlapiuosiuose kondensatoriuose vanduo, kondensatas ir oras nusiurbiami vienu šlapiuoju vakuuminiu siurbliu, sausuosiuose – vanduo ir kondensatas nuteka savaime, o dujos nusiurbiamos atskirai sausuoju vakuuminiu siurbliu.

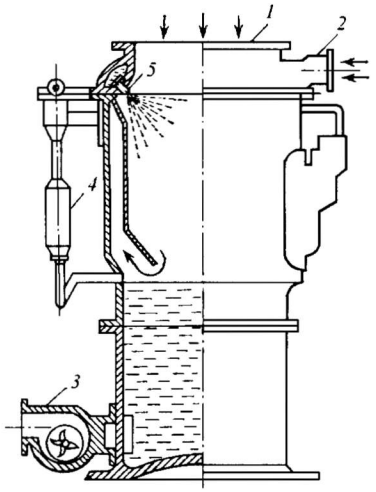
Šlapiojo pasrovinio maišymosi kondensatoriaus schema pateikta 13.29 paveiksle. Čia garų ir vandens kryptys sutampa. Paprastai dėl vakuumo kondensatoriuje vanduo, įtekantis pro atvamzdį *2*, veržiasi pro tūtas *5* ir išsitaško kondensatoriaus ertmėje. Pro atvamzdį *1* leidžiami garai maišosi su aušinančiuoju vandeniu ir kondensuojasi.

Kartu su aušinančiuoju vandeniu ir garais pro nesandarumus į kondensatorių patenka oro, kuris nesikondensuoja ir kaupdamasis jame mažina vakuumą. Iš kondensatoriaus oras išsiurbiamas siurbliu *4*. Šio tipo kondensatoriuose palaikomas $p_v = 0{,}08...0{,}09$ MPa vakuumas arba $p = 0{,}01...0{,}02$ MPa slėgis.

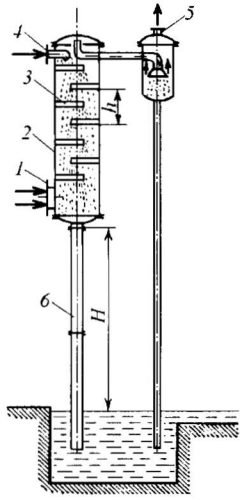
Susidaręs kondensato ir aušinančiojo vandens mišinys leidžiasi žemyn į apatinę kondensatoriaus dalį ir iš čia išsiurbiamas siurbliu *3*. Šio tipo kondensatoriai daug kompaktiškesni už barometrinius. Naudojami vidutinio našumo įrenginiuose.

Sausasis priešsrovinis barometrinis kondensatorius parodytas 13.30 pav. Čia garų ir aušinančiojo vandens tekėjimo kryptys yra priešingos. Pro atvamzdį *1* įleisti garai kyla iš apačios į viršų, o vanduo atvirkščiai. Kad vandens ir garų tarpusavio sąlytis būtų geresnis, įvairiuose aukščiuose prie cilindrinio kondensatoriaus korpuso *2* iš vidaus pritvirtinti segmentai *3*. Vanduo teka pro skylutes ir taip pat liejasi per segmento kraštus, kuriais virš segmentų

sudaromas pastovus vandens sluoksnis. Kondensatoriuje palaikomas vakuumas: pro atvamzdį *5* iš jo siurbiamas oras, o kondensato ir aušinančiojo vandens mišinys išteka pro vadinamąjį barometrinį vamzdį *6*.



13.29 pav. Šlapiasis maišymosi kondensatorius: *1* – garų tiekimo atvamzdis, *2* – vandens tiekimo atvamzdis, *3* – vandens siurblys, *4* – oro siurblys, *5* – tūtos



13.30 pav. Sausasis barometrinis maišymosi kondensatorius: *1, 4* – garų ir aušinančiojo vandens atvamzdžiai, *2* – korpusas, *3* – segmentai, *5* – oro atvamzdis, *6* – barometrinis vamzdis

Reikalingas vandens stulpelio aukštis H, m, apskaičiuojamas taip:

$$H = H_0 + H_p + 0{,}5; \qquad (13.46)$$

čia H_0 – vandens stulpelio, atsveriančio barometrinį aplinkos slėgį, aukštis, m; H_p – vandens stulpelio aukštis, kurio reikia, kad būtų nugalėti hidrauliniai pasipriešinimai ir pasiektas reikiamas srovės greitis, m; *0,5* – aukščio padidinimas, kad nebūtų užlieta garų įleidimo anga *1*.

Vanduo į tokį kondensatorių leidžiamas atvamzdžiu *4*. Nors šio tipo kondensatoriai gana dideli, bet jie turi ir tam tikrų pranašumų: yra paprasti, mažiau naudoja aušinančiojo vandens ir mažiau reikia pašalinti oro, patogu šalinti kondensato ir aušinančiojo vandens mišinį. Tokie kondensatoriai paprastai naudojami garinimo stotyse.

Maišymosi kondensatorių skaičiavimas. Skaičiuodami kondensatorių, kaip ir aušintuvą, parašome šilumos balanso lygtį:

$$G_g \cdot (h_g - h_k) = W \cdot (h_2 - h_1); \qquad (13.47)$$

čia G_g – kondensuojamų garų debitas, kg/s; h_g – šių garų entalpija, kJ/kg; h_k – kondensato entalpija, kJ/kg; W – aušinančiojo vandens debitas, *kg/s*; h_2, h_1 – iš kondensatoriaus ištekančio ir į jį įtekančio aušinančiojo vandens entalpija, kJ/kg.

Tada $\frac{W}{G_g} = \frac{h_g - h_k}{h_2 - h_1}$.

Santykis $\frac{W}{G_g} = m$ vadinamas aušinimo kartotinumo koeficientu. Maišymosi kondensatorių dažniausiai $m = 25...60$ $kg_{vandens}/kg_{garų}$.

Tuomet $m = \frac{h_g - h_k}{h_2 - h_1}$. (13.48)

Garų entalpija h_g randama lentelėse pagal garų slėgį kondensatoriuje, o kondensato, iš kondensatoriaus ištekančio vandens ir į kondensatorių įtekančio aušinančiojo vandens entalpijos apskaičiuojamos taip: $h_k \approx 4{,}19 \cdot t_k$, $h_2 \approx 4{,}19 \cdot t_2$ ir $h_1 = 4{,}19 \cdot t_1$. Čia *4,19* – vandens (kondensato) savitoji šiluma, kJ/(kg·K); t_k – kondensacijos temperatūra, kuri parenkama garų savybių lentelėse pagal slėgį p_k kondensatoriuje; t_2 – iš kondensatoriaus ištekančio vandens temperatūra. Pasroviniuose kondensatoriuose $t_2 = t_k - (5...6)$, o priešsroviniuose $t_2 = t_k - (1...3)$; t_1 – į kondensatorių įtekančio aušinančiojo vandens temperatūra. Skaičiavimuose t_1 vertes galima imti tokias: kai aušinimo sistema uždara (imant vandenį iš baseino, tvenkinio, aušinimo bokšto), $t_1 = 25...30$ °C; kai aušinantysis vanduo imamas iš upės ar ežero, $t_1 = 12...15$ °C, kai iš šulinio, – $t_1 = 10$ °C.

Iš pateiktų lygčių nustatytomis sąlygomis galima apskaičiuoti ieškomuosius parametrus: W, G_g arba t_2.

Kiek oro reikia pašalinti iš kondensatoriaus, apskaičiuojama naudojantis šia lygtimi:

$$G_0 = 0{,}001 \cdot (0{,}025 \cdot W + 10 \cdot G), \quad (13.49)$$

arba $V_0 = \frac{G_0 \cdot R_0 \cdot T_0}{p_0}$; (13.50)

čia G_0 – pašalinamo oro kiekis, kg/s; $R_0 = 288$ J/(kg·K) – oro pastovioji; T_0 – iš kondensatoriaus siurbiamo oro temperatūra, K; $T_0 = 273 + t_0$. Pasroviniame maišymosi kondensatoriuje $t_0 = t_2$, o priešsroviniame ji apskaičiuojama iš šios lygties: $t_0 = t_1 + 0{,}1 \cdot (t_2 - t_1) + 4$; t_2 – iš kondensatoriaus ištekančio vandens temperatūra; p_0 – dalinis oro slėgis: $p_0 = p - p_g$; p – bendras slėgis kondensatoriuje; p_g – dalinis garų slėgis, nustatomas iš lentelių pagal oro temperatūrą (kaip ir sočiųjų garų – iš garų savybių lentelių).

Kondensatoriaus skersmuo, m, apskaičiuojamas pagal lygtį

$$D = 1{,}13 \cdot \sqrt{G_g / (\rho \cdot w)};$$

čia w = *35...55* m/s – garų greitis; ρ – garų tankis, kg/m^3. Jį reikia nustatyti pagal slėgį iš vandens garų parametrų lentelių.

Priešsroviniame maišymosi kondensatoriuje vandens skirstymo segmentų skaičių N galima apskaičiuoti taip:

$$N = \frac{lg \frac{t_k - t_1}{t_k - t_2}}{lg \frac{t_k - t'_1}{t_k - t'_2}} \qquad (13.51)$$

ir

$$lg \frac{t_k - t'_1}{t_k - t'_2} = \frac{0{,}029}{\left(\frac{w^2}{g \cdot d_e}\right)^{0,2}} \cdot \left(\frac{h}{d_e}\right)^{0,7}; \qquad (13.52)$$

čia h – vandens kritimo aukštis tarp dviejų segmentų (aušinimo pakopos aukštis); t'_1, t'_2 – į atskirą aušinimo segmentą įtekančio ir iš jo ištekančio vandens temperatūra ; w – vandens srauto pradinis greitis, m/s.

Barometrinio vamzdžio skersmuo D_b nustatomas pagal pratekančio kondensato $G_k = G_g$ ir aušinančiojo vandens W bei mišinio $(W + G_k)$ kiekį, kai jo tekėjimo greitis w = *1...2* m/s:

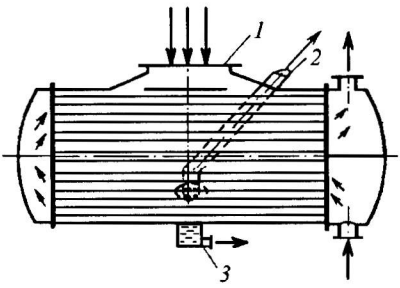
$$D_b = 1{,}13 \cdot \sqrt{\frac{G_g + W}{w \cdot \rho}}. \qquad (13.53)$$

Paviršiniai kondensatoriai. Kai reikia surinkti kondensatą, naudojami paviršiniai kondensatoriai. Juose garai nuo aušalo būna atskirti sienele: per ją aušalui perduodama garų šiluma. Taigi tokiuose kondensatoriuose kondensato neužteršia aušalas ir todėl jį galima naudoti pakartotinai.

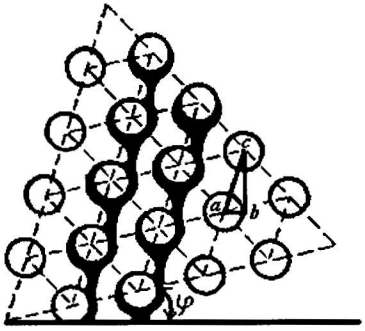
Kaip aušalas čia dažniausiai vartojamas vanduo, oras arba vandens ir oro mišinys. Atsižvelgiant į aušalą, kondensatorius galima skirstyti į tris grupes: aušinamus vandeniu, aušinamus oru ir aušinamus vandeniu ir oru.

Vandeniu aušinami paviršiniai kondensatoriai esti horizontalieji apvalkaliniai, horizontalieji apvalkaliniai gyvatukiniai ir sekciniai. Horizontalusis apvalkalinis kondensatorius yra vienas iš dažniausiai naudojamų paviršinių kondensatorių. Jo schema pateikta 13.31 pav. Ji yra tokia pat kaip ir šio tipo

garinių šildytuvų. Atvamzdžiu *1* į kondensatorių tiekiami garai, o pro atvamzdį *3* siurbliu siurbiamas kondensatas. Patekęs į kondensatorių oras siurbliu išsiurbiamas pro atvamzdį *2*. Aušinantysis vanduo teka horizontaliais vamzdžiais schemoje parodyta kryptimi.



13.31 pav. Paviršinis kondensatorius: *1, 2, 3* – garų, oro ir kondensato atvamzdžiai



13.32 pav. Paviršinių kondensatorių vamzdžių išdėstymo rėtinėse plokštėse schema

Vamzdžiai dažniausiai esti lygūs. Jie išdėstomi taip, kad kondensato dengiamų vamzdžių skaičius z_o vertikalioje eilėje būtų mažiausias arba kad nutekanti kondensato masė dengtų kuo mažesnį aušinimo paviršiaus plotą. Apytiksliai z_o galima apskaičiuoti iš tokios lygties:

$$z_0 = z^n ; \qquad (13.54)$$

čia z – bendras kondensatoriaus vamzdžių skaičius; n – koeficientas, priklausantis nuo vamzdžių išdėstymo: kai vamzdžiai sumontuoti koridorine tvarka, $n = 0,5$, o kai šachmatine tvarka – $n = 0,3$; optimalus išdėstymas – kai $n = 0,1$ (13.32 pav.).

Jeigu vamzdžiai kondensatoriuje išdėstomi šešiakampiais, geriausi rezultatai gaunami, kai šešiakampio įstrižainė būna pasukta tokiu kampu, kad kondensatas nuo viršutinio vamzdžio ant kitos eilės vamzdžio tekėtų liestine (13.32 pav.), arba kai ji yra horizontali.

Kampas φ apskaičiuojamas iš trikampio *abc* (13.32 pav.), pasinaudojant lygtimi

$$\sin(30-\varphi) = \frac{ba}{ca} = \frac{d}{2t} = \frac{1}{2\beta}. \qquad (13.55)$$

Šio tipo kondensatoriuose aušinančiojo vandens greitis $w = 1,0...2,5$ m/s; vakuumas $p_v = 0,095...0,096$ MPa. Aušinančiojo vandens temperatūros pokytis kondensatoriuje priklauso nuo pradinės temperatūros ir siekia 4...7 K. Jei aušinantysis vanduo atgal į kondensatorių negrąžinamas, savitasis aušinimo paviršius vandens garų kondensatoriuose siekia $f = 0,02...0,03$ $m^2/kg_{garų}$.

Apvalkaliniai gyvatukiniai kondensatoriai skiriasi nuo pirmųjų tuo, kad jų vamzdžiai ne tiesūs, bet lankstyti. Kondensatorių konstrukcija panaši į tokio pat tipo šildytuvų (13.13 pav.) konstrukciją.

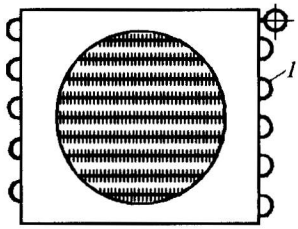
Šio tipo kondensatoriai naudojami retai. Juos nepatogu valyti, todėl vanduo turi būti švarus.

Sekciniai vamzdiniai kondensatoriai yra analogiški tokio pat tipo šildytuvams (13.16 pav.). Apvalkaliniame vamzdyje gali būti įvairus vamzdžių skaičius. Unifikuotų amoniakinių kondensatorių apvalkale išdėstoma 14 vamzdžių. Jų skersmuo $d = 38$ mm, sienelės storis 3,5 mm. Amoniako garai leidžiami į viršutinį apvalkalinį vamzdį – elementą, esantį po kiekviena sekcija.

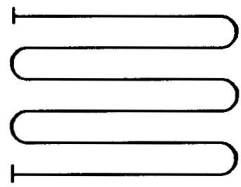
Didžiausias šių kondensatorių trūkumas – didelės metalo sąnaudos jų gamybai.

Oru aušinamų kondensatorių konstrukcija yra tokia pat kaip šildytuvų-kaloriferių (13.15 pav.). Pagal oro tekėjimo pobūdį šie kondensatoriai esti dviejų pagrindinių tipų: natūralios oro cirkuliacijos ir priverstinės oro cirkuliacijos. Šaldymo įrenginiuose naudojamas priverstinės oro cirkuliacijos kondensatorius parodytas 13.33 pav. Lankstytų, dažniausiai briaunotų, vamzdžių *1* sekcijomis teka kondensuojamojo fluido garai. Oras pučiamas ventiliatoriumi. Išorinio paviršiaus šilumos srauto tankis 230...290 W/m^2. Šios grupės priverstinės oro cirkuliacijos kondensatorių savitoji šiluminė galia esti iki 350 kW.

Natūralios oro cirkuliacijos kondensatoriai daugiausia naudojami šaldomųjų spintų agregatuose. Tokį kondensatorių sudaro lygus arba briaunotas kilpomis išlankstytas vamzdis (13.34 pav.). Vandeniu ir oru aušinami kondensatoriai esti šių tipų: vertikalieji apvalkaliniai, laistomieji ir garinamieji.

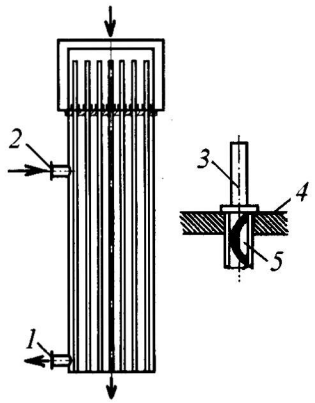


13.33 pav. Priverstinės cirkuliacijos oru aušinamo kondensatoriaus schema:
1 – briaunotieji vamzdžiai

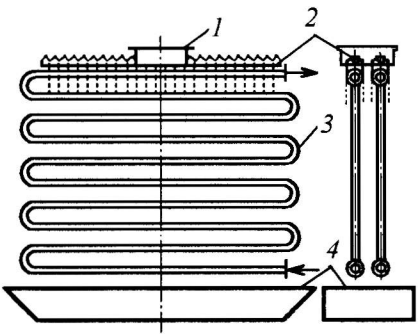


13.34 pav. Natūralios cirkuliacijos oru aušinamo kondensatoriaus schema

Vertikaliojo apvalkalinio kondensatoriaus schema parodyta 13.35 pav. Ant kondensatoriaus vertikalių vamzdžių galų uždėti antgaliai, todėl vanduo plona plėvele teka vidinėmis vamzdžių sienelėmis, neužimdamas viso jo skerspjūvio. Tokie kondensatoriai kitaip dar vadinami plėveliniais. Vamzdžius aušina ir vanduo, ir oras.



13.35 pav. Vertikalusis plėvelinis kondensatorius: *1* – kondensatas; *2* – garai; *3* – antgalis; *4* – rėtinė plokštė; *5* – vamzdis



13.36 pav. Laistomasis kondensatorius: *1* – vandens rezervuaras; *2* – vandens skirstymo kanalai; *3* – kondensatoriaus vamzdžių sekcija; 4 – vandens surinkimo lovys

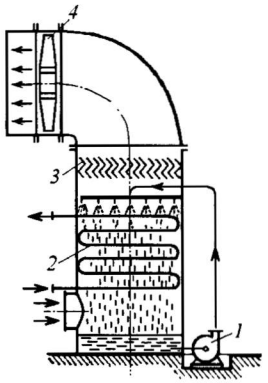
Tokio tipo amoniakiniai kondensatoriai naudojami didelio našumo šaldymo įrenginiuose. Jų vamzdžių ilgis L siekia 5,5 m, skersmuo $d = 57$ mm, sienelės storis 3,5 mm, savitoji šiluminė galia 4600...5200 W/m^2 (kai aušinančiojo vandens temperatūros pokytis 6...7 K).

Laistomasis kondensatorius parodytas 13.36 pav. Garai kondensatoriaus vamzdžiais teka schemoje parodyta kryptimi. Aušinantysis vanduo iš skirstomojo rezervuaro *1* kanalais *2* liejasi ant kilpomis išlankstytų vamzdžių sekcijų *3* ir teka į surinkimo lovį *4*. Dalis vandens išgaruoja ir perduoda šilumą orui, todėl mažiau sunaudojama aušinančiojo vandens. Kad geriau atiduotų šilumą, šie kondensatoriai statomi lauke, ant stogo ir kt. Jie užima daug vietos. Kondensuojantis amoniako garams, $k = 700...930$ W/(m^2·K) (kai $q = 4100...4600$ W/m^2).

Garinamieji kondensatoriai panašūs į laistomuosius. Skirtumas tik tas, kad čia vanduo ir oras tiekiamas mechaniškai: siurbliu ištaškomas vanduo, o ventiliatorius siurbia orą (13.37 pav.).

Kondensacijos šilumą atima vanduo ir garuodamas perduoda ją orui. Aušinančiojo vandens sąnaudos sudaro 10...15 % apvalkalinio kondensatoriaus

vandens sąnaudų. Cirkuliacinio vandens kiekis 60...100 kg/m^2. Kai kondensatoriaus našumas 1000 kJ/h, išsiurbiamo oro kiekis sudaro 29...39 m^3/h.



13. 37 pav. Priverstinės cirkuliacijos oru aušinamas kondensatorius: *1* – siurblys, *2* – kondensatoriaus vamzdžiai, *3* – vandens dalelių skirtuvas, *4* – ventiliatorius

Paviršinių kondensatorių skaičiavimas. Norint apskaičiuoti kondensatorių, reikia žinoti kondensuojamųjų garų debitą G_g, garų parametrus, aušinantįjį fluidą ir jo parametrus. Skaičiuojamas kondensatoriaus aušinimo paviršius F ir aušinančiojo fluido debitas W.

Jeigu į kondensatorių leidžiamas perkaitintieji garai ir kondensatas ataušinamas iki žemesnės temperatūros negu garų kondensacijos temperatūra (pats bendriausias atvejis), tai skaičiuojamasis paviršius pagal garų būseną skirstomas į tris dalis: F_p – kondensatoriaus paviršiaus dalis, kurioje perkaitintieji garai ataušta iki sausųjų garų būsenos, F_k – paviršiaus dalis, kurioje garai susikondensuoja, ir F_a – paviršiaus dalis, kurioje ataušta kondensatas.

Pirmiausia apskaičiuojama per kiekvieną paviršiaus dalį perduodami šilumos srautai Q_p, Q_k, Q_a, vidutinis kiekvienos dalies Δt_p, Δt_k, Δt_a temperatūros skirtumas ir šilumos perdavimo koeficientai k_p, k_k, k_a. Po to galima apskaičiuoti kondensatoriaus paviršių:

$$F = F_p + F_k + F_a = \frac{Q_p}{k_p \cdot \Delta t_p} + \frac{Q_k}{k_k \cdot \Delta t_k} + \frac{Q_a}{k_a \cdot \Delta t_a}. \qquad (13.56)$$

Aušinančiojo fluido kiekį galima apskaičiuoti, kai jau žinoma bendra kondensatoriaus šiluminė galia: $Q = Q_p + Q_k + Q_\alpha$.

Temperatūrą, iki kurios fluidas ataušta atskirose paviršiaus dalyse, galima apskaičiuoti iš šių lygybių:

$$Q_p = W \cdot c_p \cdot (t_2 - t_x),$$
$$Q_k = W \cdot c_p \cdot (t_x - t_y),$$
$$Q_\alpha = W \cdot c_p \cdot (t_y - t_1);$$

čia t_2 – iš kondensatoriaus ištekančio aušalo temperatūra; t_x, t_y – iš pirmosios į antrąją ir iš antrosios į trečiąją paviršiaus dalis ištekančio aušalo temperatūra; t_1 – į kondensatorių įtekančio aušinančiojo fluido temperatūra.

14 DALIS

ŠALDYMAS

Kai nepakanka aušinimo, medžiagos dirbtinai šaldomos. Taigi šaldymas yra toks procesas, kurio metu medžiagos temperatūra sumažinama žemiau aplinkos temperatūros. Chemijos pramonėje šaldoma suskystinant dujas, atskiriant iš mišinių komponentus, vykdant absorbcijos, kristalizacijos, sublimacinio džiovinimo ir kitus procesus.

Šiuo metu šaldymo technikoje taikomi šaldymo būdai pagal šaldymo principą ir pobūdį skirstomi taip, kaip parodyta 14.1 lentelėje.

14.1 lentelė. Šaldymo būdai ir jų charakteristikos

Šaldymo būdas	Šaldymo principas	Charakteristika
Šaldalo fazinė būsena nesikeičia		
Dujinis	Šaltos dujos tiesiog arba per skiriamąją sienelę atima šilumą iš šaldomosios medžiagos	Šaldymui nenaudojama energija
Dujinis sūkurinis	Šaldoma naudojant Ranko ir Hilšo sūkurinį vamzdį	Naudojama mechaninė energija fluidui slėgti
Dujinis mašininis	Besiplečiančios dujos aušina šaldomąją medžiagą	Naudojama mechaninė energija dujoms slėgti
Termoelektrinis	Šaldymas Peltjė metodu. Šaldoma leidžiant atitinkamos krypties srovę puslaidininkių elementais	Naudojama elektros energija
Keičiasi šaldalo fazinė būsena		
Garinamasis	Garuojantis skystis atima šilumą iš šaldomosios medžiagos	Šaldymui nenaudojama energija
Ledinis	Tirpstantis arba sublimuojamas ledas atima iš šaldomosios medžiagos šilumą	Šaldymui nenaudojama energija
Tirpalinis	Šiluma atimama maišant vandenį bei ledą su kai kuriomis druskomis arba druskas su rūgštimis (4.7 lent.)	Nenaudojama energija
Garinis mašininis	Šaldo besiplečiantys suslėgto fluido garai	Naudojama mechaninė arba šiluminė energija

Vienas paprasčiausių ir seniausių šaldymo būdų, kuriam nereikia nei mechaninės, nei elektros energijos, yra šaldymas šaldymo mišiniais. Šaldymo mišinio sudėtis priklauso nuo to, iki kokios temperatūros reikia atšaldyti medžiagą. Mišinių sudėtis ir šaldymo temperatūra nurodyta 14.2 lentelėje. Šis šaldymo būdas labai paprastas, neeikvojama papildoma energija, bet daug reikia šaldymo medžiagų, netinka nepertraukiamam šaldymo procesui ir negalima pasiekti pakankamai žemos temperatūros.

14.2 lentelė. Šaldymo mišinių sudėtis

Mišinys	Masės dalys	Susidaranti temperatūra, °C	Mišinys	Masės dalys	Susidaranti temperatūra, °C
Vanduo Amoniakas Salietra	16 5 5	-12	Ledas arba sniegas Natrio chloridas Amoniakas	5 2 1	-25
Vanduo Amonio nitratas	5 1	-15	Ledas arba sniegas Natrio chloridas Amoniakas Salietra	24 10 5 5	-28
Vanduo Amoniakas Salietra Natrio sulfatas	16 5 5 8	-15			
Vanduo Natrio karbonatas Amonio nitratas	1 1 1	-22	Ledas arba sniegas Natrio chloridas Amonio nitratas	12 5 5	-32
Druskos rūgštis Natrio sulfatas	9 8	-18			
Azoto rūgštis Natrio nitratas	2 3	-20	Ledas arba sniegas Druskos rūgštis	5 5	-32
Azoto rūgštis Natrio fosfatas	4 9	-25	Ledas arba sniegas Azoto rūgštis	4 5	-35
Azoto rūgštis Amonio nitratas Natrio sulfatas	4 5 6	-40	Ledas arba sniegas Kalcio chloridas (kristalinis)	2 3	-45
Sieros rūgštis Natrio sulfatas	4 2	-20			
Ledas arba sniegas Natrio chloridas	2 1	-20	Ledas arba sniegas Kalcio karbonatas	3 4	-46

Pagal temperatūrą šaldymas dar skirstomas į saikingąjį ir giliųjį. Saikingojo šaldymo temperatūra – $T > 120$ K, giliojo šaldymo – $T < 120$ K, t. y. $t < -150$ °C. Gilusis šaldymas, kai pasiekiama $T < 120$ K, t. y. $t < -150$ °C, temperatūra, vadinamas kriogeniniu, o kai $T = 0{,}3...0{,}00002$ K, – ultragiliuoju.

14.1. Saikingasis šaldymas

Šaldymo termodinaminiai pradmenys. Dirbtinio šaldymo procesams būdinga tai, kad šiluma atimama iš žemesnės temperatūros medžiagos ir atiduodama aukštesnės temperatūros medžiagai, o toks procesas, kaip žinome iš termodinamikos, dėl entropijos mažėjimo savaime vykti negali. Tuo nesunku įsitikinti. Sakykime, iš medžiagos, kurios temperatūra T_2, atimame šilumą Q_2 ir ją atiduodame kitai medžiagai, kurios temperatūra T_1. Tada pirmosios medžiagos entropija sumažės dydžiu $\frac{Q_2}{T_2}$, o antrosios – padidės dydžiu $\frac{Q_2}{T_1}$ ir bendras jų entropijų pokytis bus toks: $\Delta S = \frac{Q_2}{T_1} - \frac{Q_2}{T_2}$. Tačiau $T_1 > T_2$, todėl $\frac{Q_2}{T_1} < \frac{Q_2}{T_2}$, o toks procesas, kaip teigia antrasis termodinamikos dėsnis, savaime vykti negali.

Todėl, kad vyktų realus šaldymo procesas, be šilumos atėmimo ir atidavimo, dar reikalingas papildomas procesas, kuris kompensuotų entropijos sumažėjimą, o tai neišvengiamai būna susiję su energijos sąnaudomis.

Kad vyktų toks ciklas, reikia atlikti darbą, kuris virstų šiluma, o ši kartu su iš šaldomosios medžiagos atimta šiluma būtų atiduota aukštesnės temperatūros medžiagai.

Medžiaga, iš kurios atimama šiluma, vadinama šaldomąja, o kuriai atiduodama šiluma, šaldančiuoju fluidu, arba šaldalu.

Tarkime, kad iš šaldomosios medžiagos, kurios temperatūra T_2, atimame šilumą Q_2 ir ją atiduodame šaldančiajam fluidui, kurio temperatūra T_1, ir šiame cikle atliekame darbą L. Parašome energijos balanso lygtį:

$$Q_1 = Q_2 + L. \tag{14.1}$$

Tokiame cikle šaldomosios medžiagos entropija sumažėtų dydžiu $\frac{Q_2}{T_2}$, o šaldalo entropija padidėtų dydžiu $\frac{Q_1}{T_1} = \frac{Q_2 + L}{T_1}$. Toks šaldymo procesas gali vykti, jei sistemos entropija nesikeičia, t. y. kai

$$\frac{Q_2}{T_2} = \frac{Q_2 + L}{T_1}. \tag{14.2}$$

Iš čia gauname, kad

$$L = Q_2 \cdot \frac{T_1 - T_2}{T_2}. \tag{14.3}$$

Šaldymo efektas bus tuo geresnis, kuo daugiau šilumos atimsime iš šaldomosios medžiagos, išeikvodami mažiau darbo. Jis nusakomas santykiu

$$\varepsilon = \frac{Q_2}{L}. \qquad (14.4)$$

Dydis ε vadinamas šaldymo koeficientu. Juo apibūdinamas šaldymo ciklo efektyvumas.

Iš šaldomosios medžiagos cikle atimtas šilumos srautas dar vadinamas bendruoju šaldymo našumu ir žymimas Q_2.

Pasinaudojant (14.4) lygtimi, galima apskaičiuoti tokią šaldymo mašiną varančio variklio galią, kW:

$$N = \frac{Q_2}{1000 \cdot \varepsilon}. \qquad (14.5)$$

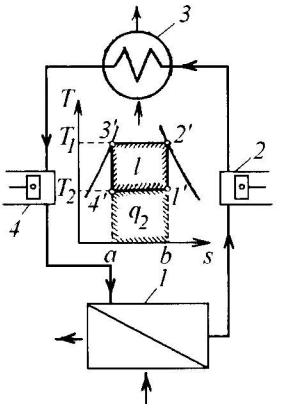
Mašininis kompresorinis šaldymas. Saikingojo šaldymo technikoje daugiausia naudojami mašininio šaldymo būdai. Atsižvelgiant į tai, kokiu būdu didinamas šaldalo slėgis, mašininiai šaldymo būdai skirstomi į kompresorinius, absorbcinius ir ežektorinius.

Dažniausiai šaldoma mašininiu kompresoriniu būdu. Čia paprastai naudojamos garinės šaldymo mašinos, kuriose šaldalu būna žemos virimo temperatūros skysčiai. Šios medžiagos verda ir išgaruoja žemesnėje kaip 0 °C temperatūroje, o suslėgtos ir aušinamos vandeniu vėl virsta skysčiu.

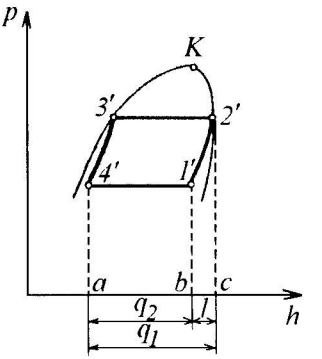
Garinį kompresorinį šaldymo agregatą sudaro šie įrenginiai: garintuvas *1*, kompresorius *2*, kondensatorius *3* ir droselis arba plėtimosi cilindras – detanderis *4*. Principinė įrenginio schema pateikta 14.1 pav.

Garintuve, esant žemai temperatūrai, garuodamas 1 kg šaldalo iš šaldomosios medžiagos arba tarpinio šaldančiojo fluido atima šilumą q_2. Kompresorius siurbia šiuos garus ir, sunaudodamas darbą l_1, juos suslegia (kompresorių dažniausiai varo elektros variklis). Suslėgti garai aušta, kondensuojasi ir atiduoda aplinkai šilumą q_1. Po to šaldalas, detanderyje plėsdamasis iki pradinio slėgio ir temperatūros, atlieka darbą l_2. Toks šaltas fluidas vėl patenka į garintuvą ir vėl garuodamas absorbuoja šilumą iš šaldomosios medžiagos arba tarpinio šaldančiojo fluido.

Pavaizdavę atskirose mašinos dalyse vykstančius procesus grafiškai, gauname idealios garų kompresorinės šaldymo mašinos ciklą, kuris atitinka atvirkštinį Karno ciklą: *1′–2′–3′–4′–1′*. Čia *1′–2′* – adiabatinis garų slėgimo procesas kompresoriuje; *2′–3′* – izobarinis–izoterminis kondensacijos procesas; *3′–4′* – adiabatinis plėtimosi procesas detanderyje; *4′–1′* – šaldalo garavimo procesas, esant pastoviai jo virimo temperatūrai T_2.



14.1 pav. Idealios šaldymo mašinos schema ir šaldymo ciklas *T-s* diagramoje: *1* – garintuvas, *2* – kompresorius, *3* – kondensatorius, *4* – detanderis



14.2 pav. Idealios kompresorinės šaldymo mašinos darbo ciklas *p–h* diagramoje

Iš ciklo matyti, kad iš šaldomosios medžiagos, kurios temperatūra T_2, atimama šiluma q_2, o aplinkai, kurios temperatūra T_1 (čia $T_1 > T_2$), atiduodama šiluma q_1 ir sunaudojamas darbas

$$l = q_1 - q_2.$$

Tuomet šaldymo koeficientas

$$\varepsilon = \frac{q_2}{l} = \frac{q_2}{q_1 - q_2}.$$

Diagramoje (14.1 pav.) matome, kad $q_1 = T_1 \cdot (s_2 - s_3)$ lygus plotui $a3'2'ba$, o $q_2 = T_2 \cdot (s_1 - s_4)$ lygus plotui $1'ba4'1'$ *ir* $s_1 - s_4 = s_2 - s_3$.

Įrašę gautas q_2 ir q_1 vertes į ε lygybę, gauname *idealios šaldymo mašinos šaldymo koeficientą:*

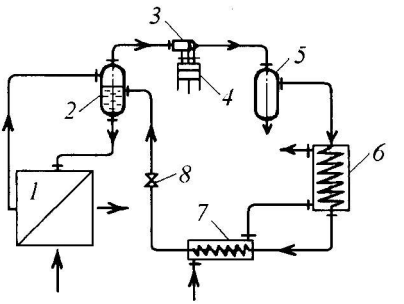
$$\varepsilon = \frac{T_2(s_1 - s_4)}{T_1(s_2 - s_3) - T_2(s_1 - s_4)} = \frac{T_2}{T_1 - T_2}; \qquad (14.6)$$

čia s_1, s_2, ... – fluido entropijos diagramoje (14.1 pav.) pažymėtuose taškuose *1'*, *2'*, ... Šaldymo koeficientas priklauso nuo šaldomosios medžiagos ir aplinkos temperatūrų skirtumo: kuo mažesnis šis skirtumas, tuo didesnė ε vertė.

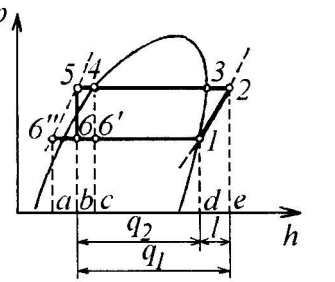
Idealios kompresorinės mašinos darbo ciklas *p–h* diagramoje pateiktas 14.2 paveiksle. Čia darbas *l* ir šilumos atitinka tiesės atkarpas, kurias lengva išmatuoti, o *T–s* diagramoje šie dydžiai atitinka daug sunkiau apskaičiuojamus

plotus. Adiabatinis šaldalo slėgimo procesas kompresoriuje atitinka *p–h* diagramos atkarpą *1′–2′*, šaldalo izobarinis–izoterminis kondensacijos procesas kondensatoriuje – atkarpa *2′–3′*, adiabatinis plėtimosi procesas detanderyje – *3′–4′* ir izobarinis–izoterminis šaldalo garavimo procesas garintuve – *4′–1′*.

Realios kompresorinės šaldymo mašinos darbo ciklas. Reali kompresorinė šaldymo mašina skiriasi nuo idealios. Konstrukcijai supaprastinti vietoj detanderio įrengtas droselinis ventilis. Norint išvengti hidraulinių smūgių, sumažinti šilumos nuostolius ir geriau pripildyti šaldalo cilindrą, į kompresorių leidžiamai ne drėgni, bet sausi garai. Be to, šaldymo našumui padidinti, esant toms pačioms energijos sąnaudoms, kondensatas ataušinamas iki žemesnės temperatūros negu kondensacijos temperatūra, t. y. jis peraušinamas.



14.3 pav. Realios kompresorinės šaldymo mašinos schema: *1* – garintuvas, *2* – skysčio skirtuvas, *3* – filtras, *4* – kompresorius, *5* – tepalo skirtuvas, *6* – kondensatorius, *7* – kondensato aušintuvas, *8* – droselinis ventilis



14.4 pav. Realios kompresorinės šaldymo mašinos darbo ciklas *p–h* diagramoje

Realų kompresorinį šaldymo įrenginį (14.3 pav.) sudaro garintuvas *1*, skysčio skirtuvas *2*, filtras *3*, kompresorius *4*, tepalo skirtuvas *5*, kondensatorius *6*, kondensato aušintuvas *7*, droselinis ventilis *8*. Tokios šaldymo mašinos teorinis darbo ciklas pavaizduotas 14.4 pav. Čia adiabatinį šaldalo sausų garų slėgimo procesą kompresoriuje vaizduoja linija *1–2*, perkaitintų garų izobarinį aušinimo procesą kondensatoriuje – linija *2–3*, izobarinį–izoterminį garų kondensacijos procesą kondensatoriuje – *3–4*, kondensato papildomą izobarinį aušinimą (peraušinimą) – *4–5*, izoentalpinį šaldalo droseliavimo procesą droselyje – *5–6* ir izobarinį–izoterminį garavimo procesą garintuve – *6–1*.

Iš šios diagramos gauname, kad vienas kilogramas šaldalo atima šilumos kiekį q_2, kJ/kg :

$$q_2 = h_1 - h_6.$$

Kondensatoriuje vienas kilogramas šaldalo aplinkai atiduoda šilumą q_1, kJ/kg:

$$q_1 = h_2 - h_5.$$

Cikle panaudotas darbas l, kJ/kg:

$$l = h_2 - h_1;$$

čia h_1, h_2 – šaldalo entalpijos pažymėtuose ciklo taškuose, kJ/kg.

Tuomet tokio ciklo šaldymo koeficientas

$$\varepsilon = \frac{q_2}{l} = \frac{h_1 - h_6}{h_2 - h_1}. \qquad (14.7)$$

Jeigu kondensatas neperaušinamas,

$$q_2 = h_1 - h_{6'}; \quad q_1 = h_2 - h_4; \quad l = h_2 - h_1; \quad \varepsilon_n = \frac{h_1 - h_{6'}}{h_2 - h_1}.$$

Gauname, kad $\varepsilon > \varepsilon_n$, nes $h_1 - h_6 > h_1 - h_{6'}$.

Savitojo šaldymo našumo padidėjimas dėl kondensato peraušinimo Δh_p, J/kg:

$$\Delta h_p = h_1 - h_6 - h_1 + h_{6'} = h_{6'} - h_6;$$

$$\Delta h_p = h_{6''} - h_6.$$

Diagramoje specifinis šaldymo našumo padidėjimas Δh_p atitinka atkarpą *bc*.

Atitinkamai padidėja ir šaldymo koeficientas, o energijos sąnaudos nepasikeičia. Todėl peraušinti labai naudinga, ypač kai taškų parametrai artimi kritiniams.

Iš diagramos taip pat nesunku nustatyti detanderio įtaką ciklo ekonomiškumui. Sakysime, jei vietoj droselinio ventilio būtų detanderis, tai turėtume

$$q_2 = h_1 - h_{6''},$$

o specifinis šaldymo našumo padidėjimas Δh_d, kJ/kg, būtų aprašomas taip:

$$\Delta h_d = q_{2d} - q_2 = h_1 - h_{6''} - h_1 + h_6 = h_6 - h_{6''}.$$

Gautasis $\Delta h_d = h_6 - h_{6''}$ diagramoje atitiktų atkarpą *ab*. Šiuo atveju sumažėtų energijos sąnaudos, padidėtų šaldymo koeficientas.

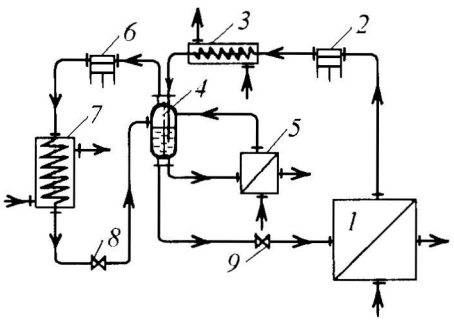
Garintuve šiluma gali būti perduota tiesiog šaldomajai medžiagai arba tarpiniam fluidui – neužšąlančiam tirpalui, kuris, tekėdamas uždaru kontūru

per šaldomuosius aparatus, perduotų jį šaldomajai medžiagai. Tokie tirpalai yra kalcio bei natrio chloridai. Šių tirpalų užšalimo temperatūra turi būti 3...5 K žemesnė už šaldalo garavimo temperatūrą. NaCl tirpalas vartojamas, kai t_2 yra iki -16 °C, o $CaCl_2$ – kai t_2 yra iki -50 °C.

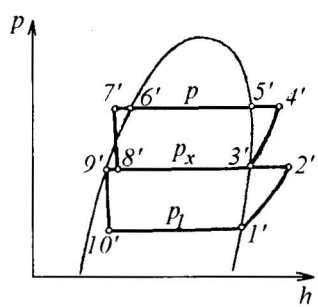
Kompresorinių šaldymo mašinų našumas priklauso nuo šaldalo garavimo ir kondensacijos temperatūrų. Iš diagramos nesunku įsitikinti, kad, didinant kondensacijos temperatūrą t_1 arba mažinant garavimo temperatūrą t_2, šaldymo našumas mažėja. Kadangi šaldymo našumas priklauso nuo ciklo vyksmo sąlygų, tai šaldymo mašinų darbo kokybei nusakyti yra nurodytos tokios standartinės sąlygos:

- kondensacijos temperatūra $t_1 = +30$ °C,
- peraušinimo temperatūra $t_p = +25$ °C,
- garinimo temperatūra $t_2 = -15$ °C.

Daugiapakopė kompresorinė šaldymo mašina. Esant žemesnei garinimo arba aukštesnei kondensacijos temperatūrai, gali susidaryti per didelis šaldalo suslėgimo laipsnis, dėl to kompresorius negali veikti reikiamu našumu, sumažėja jo pripildymo laipsnis. Tada naudojami daugiapakopio suslėgimo įrenginiai, vadinami daugiapakopėmis šaldymo mašinomis. Dviejų pakopų kompresorinės šaldymo mašinos schema parodyta 14.5 paveiksle.



14.5 pav. Dviejų pakopų kompresorinės šaldymo mašinos schema: *1*, *5* – pirmosios ir antrosios pakopų garintuvai, *2*, *6* – pirmosios ir antrosios pakopų kompresoriai, *3* – kondensatorius, *4* – tarpinis indas, *7* – peraušinimo (peršaldymo) šilumokaitis, *8*, *9* – droseliniai ventiliai



14.6 pav. Dviejų pakopų kompresorinės šaldymo mašinos darbo ciklas *p–h* diagramoje

Iš garintuvo *1* šaldalo garai siurbiami į mažo slėgio kompresoriaus cilindrą *2* ir suslegiamas jame iki tarpinio slėgio p_x (procesas *1'–2'*) (14.6 pav.). Esant šiam slėgiui, garai aušinami kondensatoriuje *3* ir iš jo leidžiami į tarpinį

indą *4*. Čia, burbuliuodami pro skysčio sluoksnį, jie ataušta iki soties temperatūros, ir iš jo išgaruoja dalis skysčio (procesas *2'–3'*). Iš tarpinio indo garai siurbiami į didelio slėgio kompresoriaus cilindrą *6* ir čia suslegiami iki kondensacijos slėgio (procesas *3'–4'*). Kondensatoriuje *7* garai ausšta, kondensuojasi ir kondensatas peraušta (procesas *4'–5'–6'–7'*). Suslėgtas peraušintas kondensatas, tekėdamas pro ventilį *8*, droseliuojasi iki slėgio p_x (procesas *7'–8'*) ir patenka į tarpinį indą *4* (taškas *8'*). Iš čia dalis išgaravusio šaldalo įsiurbiama į kompresoriaus didelio slėgio cilindrą, o kita dalis, pratekėjusi pro ventilį *9*, droseliuojasi iki garinimo slėgio (procesas *9'–10'*). Garintuve šaldalas garuodamas atima iš šaldomosios medžiagos arba tarpinio šaldalo šilumą.

Iš ciklo diagramos nesunku įsitikinti, kad, esant toms pačioms sąlygoms, daugiapakopis šaldymo ciklas yra ekonomiškesnis už vienpakopį. Tačiau pati šaldymo mašina yra sudėtingesnės konstrukcijos. Paprastai vienpakopės amoniakinės šaldymo mašinos veikia dar patenkinamai, kai suslėgimo laipsnis 8...9, t. y. kai garinimo temperatūra t_2 aukštesnė kaip -25 °C. Jeigu garinimo temperatūra žemesnė, t. y. t_2 yra nuo -25 iki -50 °C, naudojamos dviejų suslėgimo pakopų šaldymo kompresorinės mašinos, o kai t_2 nuo -50 iki -70 °C, – trijų pakopų.

Šaldalai. Šaldalas, arba šaldantysis fluidas, kuris atima garintuve šilumą ir perduoda ją kondensatoriuje aušinamam vandeniui, vadinamas pagrindiniu, o fluidas, kuris iš šaldomosios medžiagos atimtą šilumą perduoda garintuve esančiam fluidui, vadinamas tarpiniu.

Kompresorinio šaldymo technikoje vartojama daug įvairiausių rūšių pagrindinių šaldalų. Jie visi turi atitikti tokius reikalavimus: 1) jų garavimo ir virimo slėgis turi būti didesnis už atmosferos slėgį arba jam artimas, o dirbant vakuume, absoliutusis garavimo slėgis turi būti didesnis kaip 0,01 MPa; 2) garavimo šiluma turi būti kuo didesnė, o savitasis garo tūris kuo mažesnis, nes tuomet mažesni būna mašinos matmenys; 3) užšalimo temperatūra turi būti žemesnė už garavimo temperatūrą; 4) turi nereaguoti su tepalais ir neskatinti mašinos detalių korozijos; 5) turi nekenkti žmogui ir būti nedegūs. Turbininių kompresorinių šaldymo mašinų šaldalai turi būti kuo didesnės molekulinės masės.

Stūmoklinėse šaldymo mašinose šaldalais būna amoniakas, anglies dvideginis, sieros dvideginis, metilo chloridas, freonai, o jeigu reikia žemos garavimo temperatūros (žemesnės kaip -70 °C), – propanas, etanas ir etilenas.

Vienas daugiausia naudojamų šaldalų yra amoniakas. Jis vartotinas, kai garavimo temperatūra iki -65 °C. Vartojant amoniaką, reikia palyginti nedidelio mašinos cilindro. Amoniakas lengvai gaunamas, ir greitai iš kvapo pajaučiama, jei aparatas yra nesandarus. Tačiau amoniakas turi ir trūkumų: yra nuodingas, gali užsidegti, su oru sudaro sprogstamą mišinį, be to, drėgnoje aplinkoje sukelia vario ir jo lydinių koroziją.

Anglies dvideginis nekenksmingas; be to, mašinų cilindrai būna pačių mažiausių matmenų. Didžiausias trūkumas – didelis kondensacijos slėgis. Dėl mažų matmenų angliarūgštinės šaldymo mašinos naudojamos laivuose.

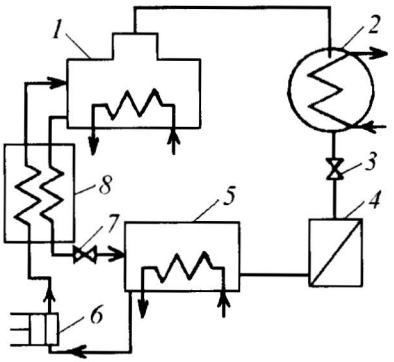
Šiuo metu iš šaldalų labai paplitę yra freonai (fluoro ir angliavandenilių junginiai). Jie dažniausiai neturi kvapo, yra nesprogūs ir nedegūs. Stūmoklinėms šaldymo mašinoms, kuriose garinimo temperatūra t didesnė kaip -70 °C, dažniausiai vartojamas R–12 markės freonas (CCl_2F_2). R–13 ($CClF_3$) ir R–22 ($CHClF_2$) markių freonai vartojami vietoj propano, etano ir etileno, kai reikia žemos garavimo temperatūros. Freonas R–13 taip pat vartojamas vietoj CO_2.

Turbininėms kompresorinėms šaldymo mašinoms, kai garinimo temperatūra $t > -20$ °C, plačiausiai vartojamas fluidas buvo dichlormetanas ir freonas R–11 (CCl_3F). Dabar vietoj dichlormetano vartojamas freonas R–113 ($C_2Cl_3F_3$). Esant žemesnei garavimo temperatūrai – iki -80 °C, vartojamas freonas R–12.

Tarpiniam fluidui keliami tokie reikalavimai: 1) žema užšalimo temperatūra ir nedidelė klampa žemoje temperatūroje; 2) didelė jo savitoji šiluma (c_p), didelis šiluminio laidžio koeficientas λ ir didelis šilumos atidavimo koeficientas; 3) jis turi būti nedegus, nesprogus ir nenuodingas; 4) turi neveikti metalų.

Kaip tarpiniai šaldalai plačiausiai vartojami NaCl, $MgCl_2$, $CaCl_2$ vandeniniai tirpalai.

Mašininis absorbcinis šaldymas. Taikant šį būdą, šaldymo efektui gauti naudojama šiluminė energija. Absorbcinės šaldymo mašinos schema pavaizduota 14.7 pav. Joje kaip šaldalas dažniausiai vartojamas vandeninis amoniako tirpalas.



14.7 pav. Absorbcinės šaldymo mašinos schema:
1 – generatorius, *2* – kondensatorius, *3* – droselinis ventilis, *4* – garintuvas, *5* – absorberis, *6* – siurblys, *7* – ventilis, *8* – šilumokaitis

Generatoriuje *1* šildomas tirpalas, kuriame yra lengvai garuojančio komponento (amoniako). Garas, susidaręs daugiausia iš lakiojo komponento, pa-

tenka į kondensatorių *2*. Kondensatas, tekėdamas pro ventilį *3*, droseliuojasi ir patenka į garintuvą *4*. Čia, absorbuodamas šaldomosios medžiagos arba tarpinio šaldalo šilumą, jis vėl garuoja ir patenka į aušinimo indą *5* – absorberį, kur vėl ištirpsta iš generatoriaus atitekančiame mažos koncentracijos tirpale. Jam tirpstant išsiskirianti šiluma pašalinama aušinant absorbentą. Absorberyje susidarantis koncentruotas tirpalas siurbliu *6* pro šilumokaitį *8*, šildomą iš generatoriaus į absorberį tekančiu mažos koncentracijos tirpalu (jo kiekis reguliuojamas ventiliu *7*), vėl grąžinamas į generatorių. Siurblio sunaudojamos mechaninės energijos galima nepaisyti, nes ji labai maža.

Šios mašinos šaldymo ciklo energijos balansą, sudarytą 1 kg fluido, galima išreikšti taip:

$$q_2 + q_g = q_k + q_{ab}; \qquad (14.8)$$

čia q_2 – šiluma, kurią 1 kg šaldalo atima iš šaldomosios medžiagos arba iš tarpinio šaldalo, kJ/kg; q_g – šiluma, kurią generatoriuje gauna 1 kg šaldalo, kJ/kg; q_k – kondensatoriuje iš 1 kg šaldalo atimama šiluma, kJ/kg; q_{ab} – absorberyje iš 1 kg šaldalo atimama šiluma, kJ/kg.

Absorbcinės mašinos šaldymo koeficientas reiškiamas gauto šalčio ir generatoriuje sunaudotos šilumos santykiu:

$$\varepsilon = \frac{q_2}{q_g}.$$

Remiantis antruoju termodinamikos dėsniu, galima parašyti:

$$\frac{q_g}{T_g} + \frac{q_2}{T_2} - \frac{q_k}{T_1} - \frac{q_a}{T_1} = 0, \qquad (14.9)$$

arba

$$\frac{q_g}{T_g} + \frac{q_2}{T_2} = \frac{q_k + q_a}{T_1};$$

čia T_g – absoliučioji fluido temperatūra generatoriuje, K; T_2, T_1 – išgarinimo ir kondensacijos absoliučiosios temperatūros atitinkamai garintuve ir kondensatoriuje, K.

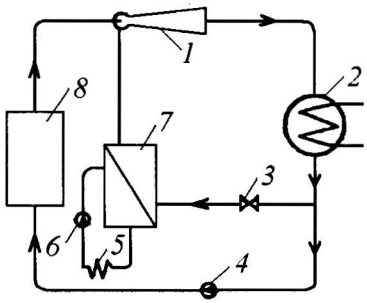
Iš (14.8) ir (14.9) lygybių gauname:

$$\varepsilon = \frac{\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_g}}{\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}}. \qquad (14.10)$$

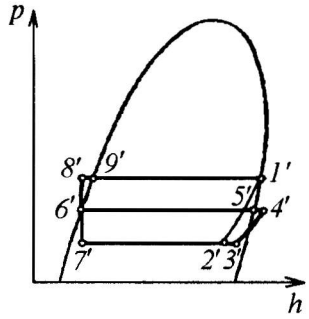
Kaip matyti iš (14.10) lygybės, didėjant T_g ir T_2, absorbcinės mašinos šaldymo koeficientas didėja; didėjant kondensacijos temperatūrai, jis mažėja.

Esant tai pačiai temperatūrai, kompresorinių mašinų šaldymo koeficientas visada didesnis už absorbcinių mašinų šaldymo koeficientą. Absorbcinių šaldymo mašinų konstrukcija daug paprastesnė nei kompresorinių. Jos naudojamos tuomet, kai turima antrinių šilumos rezervų: naudotųjų garų, karštų išmetamųjų dujų ir kt., taip pat kai reikia gauti žemą (iki -50 °C) garinimo temperatūrą ir jei kompresorinė mašina tokiais atvejais būtų per daug sudėtingos konstrukcijos.

Mašininis ežektorinis šaldymas. Ežektorinės šaldymo mašinos schema pateikta 14.8 pav.



14.8 pav. Ežektorinės šaldymo mašinos schema: *1* – ežektorius, *2* – kondensatorius, *3* – reguliavimo ventilis, *4, 6* – tiekimo ir recirkuliacijos siurbliai, *5* – šilumokaitis, *7* – garintuvas, *8* – katilas



14.9 pav. Ežektorinės šaldymo mašinos darbo ciklas *p–h* diagramoje

Čia kaip šaldalas naudojamas vanduo. Iš katilo *8* 0,3...0,6 MPa slėgio garai, tekėdami ežektoriumi *1*, garintuve *7* sudaro vakuumą. Ežektoriaus *1* iš garintuvo siurbiami garai ežektoriuje maišosi su tekančių garų srove ir jo difuzoriuje suslegiami iki tokio slėgio, koks yra kondensatoriuje, t. y. iki 30...40 mm Hg. Tokio slėgio garai, aušinami vandeniu, kondensuojasi kondensatoriuje *2*. Iš čia dalis kondensato pro reguliavimo ventilį *3* patenka į garintuvą *7*, o kita jo dalis siurbliu *4* tiekiama į garo katilą *8*. Šaltis gaunamas garuojant kondensatui garintuve. Jis gali būti perduodamas tiesiog per garintuvo sieneles šaldomajai medžiagai, o jeigu šaldomajai medžiagai yra įrengtas specialus šilumokaitis *5*, – tarpiniam šaldalui, kuris šiuo šilumokaičiu cirkuliuoja, varomas siurblio *6*.

Teorinis šios mašinos ciklas *p–h* diagramoje pavaizduotas 14.9 pav. Jį sudaro šie procesai: adiabatinis garų plėtimosi procesas ežektoriuje – *1'–2'*;

izobarinis iš garintuvo siurbiamų garų ir iš katilo į ežektorių įtekančių garų srautų maišymosi procesas – *2'–3'*; adiabatinis garų mišinio suslėgimo procesas ežektoriaus difuzoriuje – *3'–4'*; izobarinis garų aušinimo ir kondensavimo procesas kondensatoriuje – *4'–5'–6'*; izoentalpinis droseliavimo procesas, tekant fluidui pro reguliavimo ventilį, – *6'–7'*; izobarinis garavimo procesas garintuve – *7'–2'*; adiabatinis į katilą tiekiamo kondensato slėgimo procesas – *6'–8'*; izobarinis vandens šildymo katile procesas – *8'–9'*; izobarinis–izoterminis vandens garavimo procesas katile – *9'–1'*.

Pažymėjus 1 kg šaldalo įgytą šilumą garintuve q_2, kJ/kg, katile – q_k, kJ/kg, kondensatoriuje šaldalo aušinančiajam vandeniui atiduotą šilumą q_1, kJ/kg, katilo maitinimo siurblio atliktą darbą l, kJ/kg, galima sudaryti ciklo energijos balansą:

$$q_k + q_2 = q_1 + l.$$

Tada ežektorinės šaldymo mašinos šaldymo koeficientas

$$\varepsilon = \frac{q_2}{q_k + l}. \qquad (14.11)$$

Kadangi $q_k >> l$, o veikiantis maitinimo siurblys sunaudoja daug mažiau energijos, negu jos šaldalas įgyja katile, tai l paprastai nepaisoma. Tuomet

$$\varepsilon = \frac{q_2}{q_k}. \qquad (14.12)$$

Nesunku įsitikinti, kad tokiomis pačiomis sąlygomis ežektorinių mašinų šaldymo koeficientas būna mažesnis už kompresorinių, o kartais ir už absorbcinių mašinų šaldymo koeficientus. Jos sunaudoja daug garų ir daug daugiau negu kompresorinės mašinos aušinančiojo vandens.

Į ežektorių tiekiamų garų optimalus slėgis 0,8...1,0 MPa, mažiausias slėgis 0,1 MPa, bet tada iki 50 % padidėja garų sąnaudos.

Ežektorinėse šaldymo mašinose kaip šaldalą galima naudoti vandenį, nes jo garavimo šiluma beveik du kartus didesnė negu amoniako. Tačiau dėl labai mažo garavimo slėgio ir gana didelio garų savitojo tūrio vanduo visiškai netinka kompresorinėms mašinoms. Ežektorinėms mašinoms šie jo trūkumai neturi esminės vertės.

Ežektorinės šaldymo mašinos pirmiausia naudotinos ten, kur yra gana aukšta garinimo temperatūra (iki +10 °C), nes tada jos būna ekonomiškesnės už absorbcines mašinas. Didžiausias ežektorinių šaldymo mašinų trūkumas yra tai, kad sunku reguliuoti jų darbą, nes ežektorius našiai dirba tik būdamas maksimaliai apkrautas. Todėl ten, kur našumą reikia reguliuoti, įrengiamas ne vienas, bet keletas lygiagrečiai veikiančių ežektorių, kad prireikus kiekvieną iš jų būtų galima įjungti arba išjungti.

14.2. Gilusis šaldymas

Bendrieji duomenys. Technikoje iš mišinių išskiriamos dujos paprastai yra skystinamos. Tačiau dėl aukštos šaldalų virimo temperatūros, saikingai šaldant, negalima pasiekti tų dujų skystėjimo temperatūros. Garavimo temperatūrą galima sumažinti iki reikiamos žemiausios temperatūros sumažinus garintuve slėgį. Tačiau, sumažinus slėgį, labai sunkiai ir nepatikimai veikia kompresoriai; be to, gali užšalti kai kurie saikingajam šaldymui naudojami šaldalai ir sunku palaikyti aparatūros sandarumą. Todėl saikingojo šaldymo metodai giliajam šaldymui netinka.

Dujų išskyrimas iš mišinių ir jų suskystinimas termodinaminiu požiūriu yra atvirkštiniai procesai, kurie vyksta mažėjant entropijai. Kadangi izoliuotos sistemos entropija savaime mažėti negali, tai šiems procesams vykdyti reikia naudoti energiją ir atlikti darbą, kurį galima išreikšti tokia lygybe:

$$l = q_1 - q_2;$$

čia q_1 – vieno kilogramo dujų aplinkai atiduota šiluma, kJ/kg; q_2 – iš vieno kilogramo dujų šaldymo procesuose atimta šiluma, arba specifinis šaldymo našumas, kJ/kg.

Tačiau aplinkai atiduotą dujų šilumą galima išreikšti taip:

$$q_1 = T \cdot \Delta s.$$

Tada darbo sąnaudos

$$l = T \cdot \Delta s - q_2.$$

Minimaliai darbo sunaudojama tuomet, kai aplinkos entropijos padidėjimas lygus apdorojamų dujų entropijos sumažėjimui.

Tarkime, kad vieno kilogramo dujų mišinio, kurio entalpija h, kJ/kg, šaldymo cikle suskystinama dalis x ir šios suskystintos dalies entalpija yra h_0, kJ/kg; nesuskystinta dalis yra $(1–x)$, o šios dalies entalpija h_2, kJ/kg. Tuomet specifinį šaldymo našumą galima išreikšti taip:

$$q_2 = h_1 - \left[h_o \cdot x + h_2 \cdot (1 - x)\right]. \qquad (14.13)$$

Panaudodami nesuskystintos dujų dalies šaltį tiekiamam dujų mišiniui šaldyti ir sudarę idealias rekuperacijos sąlygas, gautume, kad $h_2 = h_1$. Tuomet šaldymo našumas būtų toks:

$$q_2 = (h_1 - h_o) \cdot x. \qquad (14.14)$$

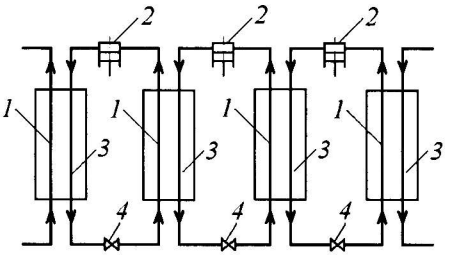
Taigi šaltis būtų panaudotas dujoms suskystinti. Tačiau rekuperacija niekada nebūna ideali ir visuomet patiriama šalčio nuostolių į aplinką, todėl šaldymo našumas išreiškiamas tokia lygybe:

$$q_2 = x \cdot (h_1 - h_o) + q_n; \qquad (14.15)$$

čia q_n — šalčio nuostoliai, kJ/kg, į aplinką ir dėl neidealios rekuperacijos.

Dujoms išskirti iš mišinių ir joms suskystinti gali būti taikomi įvairūs giliojo šaldymo metodai, pagrįsti skysčių garavimo žemesnėje temperatūroje, dujų droseliavimo, jų plėtimosi, adiabatinio išsimagnetinimo ir kitais efektais.

Giliojo šaldymo ciklas, pagrįstas skysčių garavimu žemoje temperatūroje (kaskadinis ciklas). Žemai temperatūrai gauti viename įrenginyje naudojami keli šaldalai: kiekvienas aukštesnės virimo temperatūros fluidas, garuodamas garintuve, atima šilumą iš besikondensuojančio kito šaldalo, kurio virimo temperatūra žemesnė. Taigi, skystėjant antrajam fluidui, susidaro daug žemesnė temperatūra, negu skystėjant pirmajam. Parinkus tam tikrus fluidus, galima gauti gana žemą (iki 63 K) temperatūrą. Tokia šaldymo sistema vadinama kaskadine, o pats ciklas – kaskadiniu. Kaskadinio šaldymo schema pateikta 14.10 pav. Pirmojoje kaskadoje šaldalas yra amoniakas, antrojoje – etilenas, trečiojoje – metanas, ketvirtojoje – azotas. Kiekvienos kaskados kompresoriuje *2* suslėgti šaldalo garai kondensuojasi kondensatoriuose *3*; čia juos aušina garintuve *1* garuojantis kitos kaskados šaldalas.



14.10 pav. Kaskadinio šaldymo schema: *1* – garintuvas, 2 – kompresorius, *3* – kondensatorius, *4* – droselinis ventilis

Iš visų dujų skystinimo būdų kaskadiniame įrenginyje dujoms suskystinti sunaudojama mažiausiai energijos. Tačiau dėl įrenginio sudėtingumo ir šaldalų įvairumo kaskadinis dujų skystinimas pramonėje nepaplito.

Didelio slėgio vienkartinio droseliavimo giliojo šaldymo įrenginys. Šio įrenginio principinė schema pateikta 14.11 pav., o jo darbo ciklas pavaizduotas *T–s* diagramoje.

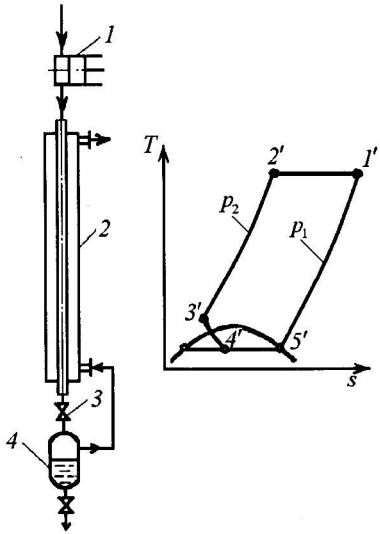
Kompresoriuje *1* nuo p_1 iki p_2 izotermiškai suslėgtos dujos (procesas *1′–2′*) patenka į šilumokaitį *2*. Čia jas šaldo iš suskystintųjų dujų surinkimo indo *4* tekančios dar nesuskystėjusios šaltos dujos. Šis šaldymo procesas *2′–3′* yra izobarinis. Tekėdamos pro ventilį *3*, dujos droseliuojasi. Vyksta izoentalpinis procesas *3′–4′*. Dujų dalis *x* virsta skysčiu ir renkasi inde *4*, kita dujų dalis (*1–x*), tekėdama aušintuvu, įšyla nuo T_2 iki T_1 temperatūros (esant pastoviam slėgiui) – procesas *5′–1′*.

Pažymėkime suskystintųjų dujų entalpiją h_o, kJ/kg, iš kompresoriaus į šilumokaitį įtekančių dujų entalpiją h_2, o į kompresorių įsiurbiamų dujų entalpi-

ją h_1. Tuomet, pasinaudodami (14.15) lygybe, galime parašyti, kam lygus tokio įrenginio specifinis šaldymo našumas:

$$q_2 = x \cdot (h_1 - h_o) + q_n;$$

čia q_n – šalčio nuostoliai į aplinką.



14.11 pav. Didelio slėgio vienkartinio droseliavimo giliojo šaldymo įrenginys ir jo darbo ciklas *T–s* diagramoje: *1* – kompresorius, *2* – šilumokaitis, *3* – droseliavimo ventilis, *4* – suskystintųjų dujų indas

Parašę 1 kg dujų šilumos balansą, gautume:

$$h_2 = x \cdot h_o + (1 - x) \cdot h_1';$$

čia h_1' – iš šilumokaičio ištekančių įšilusių dujų entalpija, J/kg; idealiu atveju $h_2' = h_1$, o $q_n = 0$.

Tada iš (14.15) lygybės gauname, kad

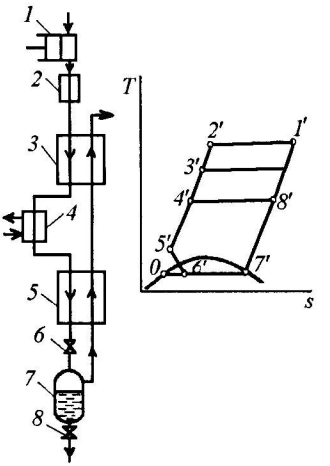
$$x = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_o},$$

o $$q_2 = x(h_1 - h_o) \qquad (14.16)$$

ir $$q_2 = x(h_1 - h_o) = h_1 - h_2. \qquad (14.17)$$

Kaip matyti iš (14.17) lygties, šio įrenginio šaldymo našumas priklauso nuo h_1 ir h_2 skirtumo, kuris didėja didinant galinį slėgį p_2. Šio tipo oru aušinamuose giliojo šaldymo įrenginiuose slėgis būna iki 20,0 MPa. Tačiau, smarkiai slegiant dujas, sunaudojama daug energijos, be to, nedidelis yra šio ciklo šaldymo koeficientas. Šaldymo efektyvumui padidinti buvo sukurti patobulinti giliojo šaldymo, papildomai aušinant bei dvigubai droseliuojant, ciklai.

Giliojo šaldymo įrenginys, skystinantis prieš vienkartinį droseliavimą papildomai atšaldytas dujas. Šis įrenginys (14.12 pav.) skiriasi nuo išnagrinėtojo tuo, kad jame vietoj vieno šilumokaičio įrengti trys: pradinis *3*, pagalbinis *4* ir pagrindinis *5*. Pagalbiniame šilumokaityje dujos šaldomos amoniaku. Suslėgtos kompresoriuje *1* ir prie jo esančiame aušintuve *2* iki pradinės temperatūros ataušusios dujos patenka į šilumokaitį *3*, kur aušinamos šaltomis nesuskystintomis dujomis. Po to jos patenka į pagalbinį šilumokaitį, šaldomą amoniaku, čia atšąla iki -40 °C ir teka į pagrindinį šilumokaitį *5*, šaldomą išsiplėtusių nesuskystintų dujų. Jame atšalusios dujos droseliuojasi pro ventilį *6*, todėl jų temperatūra dar labiau sumažėja ir dalis jų (x) suskystėja. Kita dujų dalis ($1–x$), tekėdama pagrindiniu ir pradiniu šilumokaičiais, vėl įšyla iki pradinės temperatūros.



14.12 pav. Giliojo šaldymo įrenginys, skystinantis prieš vienkartinį droseliavimą papildomai atšaldytas dujas, ir jo darbo ciklas *T–s* diagramoje: *1* – kompresorius, *2* – aušintuvas, *3, 4, 5* – pradinis, pagalbinis ir pagrindinis skystinamųjų dujų šilumokaičiai, *6* – droseliavimo ventilis, 7 – suskystintųjų dujų surinkimo indas, *8* – suskystintųjų dujų išleidimo ventilis

Šio giliojo šaldymo įrenginio darbo ciklą sudaro tokie procesai: izoterminis dujų slėgimo procesas kompresoriuje – *1'–2'*; izobarinis dujų aušinimo procesas pradiniame šilumokaityje – *2'–3'*; izobarinis dujų šaldymas pagalbi-

niame šilumokaityje – *3'–4'*; izobarinis dujų šaldymo procesas pagrindiniame šilumokaityje – *4'–5'*; atšaldytų dujų droseliavimo procesas – *5'–6'*; nesuskystintų dujų izobariniai įšilimo procesai pagrindiniame ir pradiniame šilumokaičiuose – *7'–8'* ir *8'–1'*.

Tokio įrenginio specifinį šaldymo našumą galima aprašyti pasinaudojant (14.15) lygtimi:

$$q_2 = x(h_6 - h_0) + q_n.$$

Suskystintųjų dujų dalį x galima apskaičiuoti iš vienam kilogramui dujų sudarytos šilumos balanso lygties:

$$h_3 = x \cdot h_0 + (1 - x) \cdot h_6;$$

$$x = \frac{h_6 - h_3}{h_6 - h_0}. \qquad (14.18)$$

Tada $q_2 = h_6 - h_3 + q_n$.

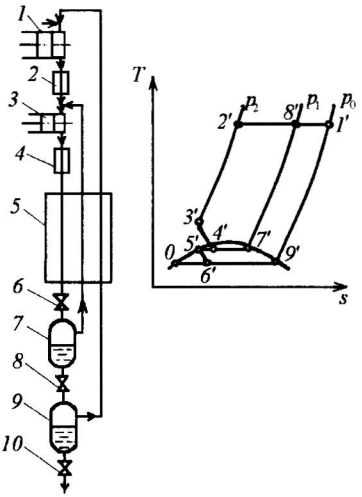
Dvigubo droseliavimo giliojo šaldymo įrenginys. Iš termodinamikos žinome, kad dujoms suslėgti didesnių slėgių intervale reikia mažiau energijos, negu joms suslėgti tokiu pat dydžiu mažesnių slėgių intervale. Pvz., dujoms suslėgti nuo 5,0 MPa iki 20,0 MPa reikia 2,8 karto mažiau energijos, negu joms suslėgti nuo 0,1 MPa iki 5,0 MPa. Todėl, taupant energiją, giliojo šaldymo technikoje buvo panaudotas pakartotinio droseliavimo didelių slėgių intervale metodas.

Tokio įrenginio principinė schema ir darbo ciklas *T–s* diagramoje pavaizduoti 14.13 paveiksle.

Šį įrenginį sudaro kompresoriai *1*, *3* ir jų aušintuvai *2*, *4*, šilumokaitis *5*, droseliavimo ventiliai *6*, *8* ir suskystintųjų dujų indai *7*, *9*. Kompresoriuje *1* dujos suslegiamos nuo aplinkos slėgio p_0 iki tarpinio slėgio p_1 (slegiant orą, $p_1 = 4{,}6$ MPa), o kompresoriuje *3* – nuo p_1 iki p_2 (slegiant orą, $p_2 = 20$ MPa). Suslėgtos iki p_2 ir ataušintos kompresorių aušintuvuose *2* ir *4* dujos šilumokaityje *5* dar daugiau atšąla ir, tekėdamos pro ventilį *6*, droseliuojasi iki slėgio p_1. Suskystėjusios dujos nuteka į indą *7*, o kita jų dalis vėl grįžta į šilumokaitį *5*, įšyla jame iki pradinės temperatūros ir yra įsiurbiamos į kompresorių *3*, kur suslegiamos pakartotinai.

Dalis suskystintųjų dujų teka pro ventilį *8*, kur droseliuojasi iki slėgio p_0. Dalis jų išgaruoja ir patenka į šilumokaitį *5*, kur, sugerdamos šilumą, įšyla iki pradinės temperatūros T_0 ir vėl įsiurbiamos į kompresorių *1*.

Visus šiame įrenginyje vykstančius procesus galima pavaizduoti *T–s* diagramoje: izoterminis dujų slėgimo procesas kompresoriuose – *1'–2'*; izobarinis suslėgtų dujų šaldymo procesas šilumokaityje – *2'–3'*; pirmojo droseliavimo izoentalpinis procesas – *3'–4'*; po pirmojo droseliavimo nesuskystėjusių dujų izobarinis įšilimo procesas šilumokaityje – *7'–8'*; antrojo droseliavimo procesas – *5'–6'*; po antrojo droseliavimo išgaravusių dujų izobarinis įšilimo procesas – *9'–1'*.



14.13 pav. Dvigubo droseliavimo giliojo šaldymo įrenginys ir jo darbo ciklas *T–s* diagramoje: *1*, *3* – kompresoriai, *2*, *4* – kompresorių aušintuvai, *5* –šilumokaitis, *6*, *8* – droseliavimo ventiliai, *7*, *9* – suskystintųjų dujų indai, *10* – suskystintųjų dujų išleidimo ventilis

Tokio įrenginio specifinį šaldymo našumą galime aprašyti pasinaudodami (14.13) lygybe:

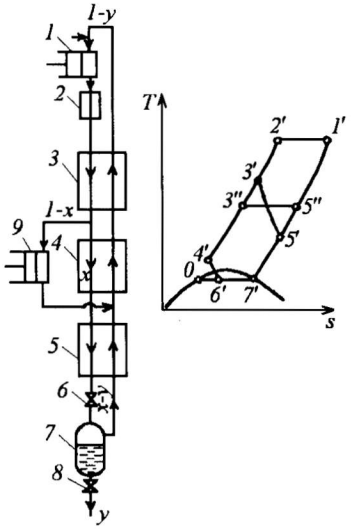
$$q_2 = y \cdot (h_1 - h_0) + q_n; \qquad (14.19)$$

$$y = \frac{h_8 - h_2 + x \cdot (h_1 - h_8)}{h_1 - h_0};$$

čia h_1, h_2, ... – dujų entalpijos pažymėtuose ciklo taškuose *1'*, *2'*, ... kJ/kg; x – po pirmojo droseliavimo suskystėjusių dujų dalis, kg/kg; q_n – šalčio nuostoliai, kJ/kg; y – vieno kilogramo dujų suskystintoji dalis, kg/kg.

Vidutinio slėgio Klodo ciklas. Teorinė šaldymo ciklų analizė rodo, kad dujų plėtimuisi ekonomiškiau yra naudoti detanderius. Tačiau iš tikrųjų giliojo šaldymo cikluose skystinant dujas labai žemoje temperatūroje, detanderis veikia neefektyviai, nes žemoje temperatūroje dujos sunkiau plečiasi, atsiranda hidraulinių smūgių ir labai padidėja šalčio nuostoliai. Todėl, skystinant dujas žemesnėje temperatūroje, detanderiai naudojami tik pradiniam dujų atšaldymui; galutinai dujų temperatūra pažeminama droseliais.

Šio pobūdžio giliojo šaldymo ciklai labai įvairūs. Jie skiriasi tik dujų suslėgimo dydžiu ir detanderių konstrukcija. Iš tokių ciklų pažymėtini Klodo, Heilandto, Kapicos ir kt. ciklai.



14.14 pav. Vidutinio slėgio giliojo šaldymo įrenginio schema ir jo darbo ciklas *T*–*s* diagramoje: *1* – kompresorius, *2* – kompresoriaus aušintuvas, *3, 4, 5* – šilumokaičiai, *6* – droselinis ventilis, *7* – suskystintųjų dujų indas, *8* – suskystintųjų dujų išleidimo ventilis, *9* – detanderis

Klodo ciklas ir veikiančio įrenginio schema pateikta 14.14 paveiksle. Kompresoriuje *1* suslėgtos iki 2,5...40 MPa ir aušintuve *2* iki pradinės temperatūros ataušintos (procesas *1'–2'*) dujos toliau aušta priešsroviniame šilumokaityje *3* (izobarinis procesas *2'–3'*). Po to dalis dujų (*1–x*) patenka į detanderį *9*, kur, plėsdamosi iki pradinio slėgio, atlieka darbą (procesas *3'–5'*), o dalis *x* patenka į šilumokaitį *4*, paskui į šilumokaitį *5*, kuriuose izobariškai atšąla (procesai *3'–3''* ir *3''–4'*). Toliau šios dujos, tekėdamos pro ventilį *6*, droseliuojasi iki pradinio slėgio (procesas *4'–6'*). Šiame procese dalis dujų *(y)* suskystėja, o dalis jų *(x–y)*, tekėdamos šilumokaičiu *5*, įšyla (procesas *7'–5''*), paskui, susimaišiusios su dujomis iš detanderio ir tekėdamos pro šilumokaičius *4* bei *3*, izobariškai įšyla iki pradinės temperatūros (procesas *5''–1'*).

Pasinaudodami (14.13) lygtimi, galime parašyti, kam lygus šio įrenginio specifinis šaldymo našumas:

$$q_2 = y \cdot (h_1 - h_0) + q_n; \qquad (14.20)$$

čia y – suskystintoji vieno kilogramo perdirbamų dujų dalis.

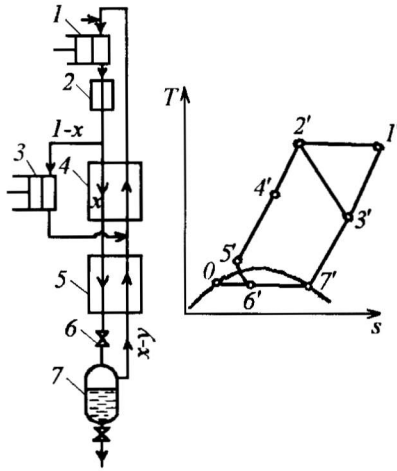
Tačiau

$$y = \frac{(h_1 - h_2) + (1 - x) \cdot (h_3 - h_5)}{h_1 - h_0} \qquad (14.21)$$

ir

$$q_2 = (h_1 - h_2) + (1 - x) \cdot (h_3 - h_5) + q_n; \qquad (14.22)$$

čia $1–x$ – dujų dalis, besiplečianti detanderyje, kg/kg; h_1, h_2 ... – dujų entalpijos pažymėtuose diagramos taškuose; q_n – šalčio nuostoliai, kJ/kg.



14.15 pav. Didelio slėgio giliojo šaldymo įrenginys ir jo darbo ciklas *T–s*: *1* – kompresorius; *2* – kompresoriaus aušintuvas; *3* – detanderis; *4,5* – šilumokaičiai; *6* – droselinis ventilis; *7* – suskystintųjų dujų indas

Didelio slėgio giliojo šaldymo ciklas (Heilandto ciklas). Šis ciklas panašus į Klodo ciklą. Skiriasi tik tuo, kad po izoterminio slėgimo kompresoriuje dalis dujų patenka į detanderį. Taigi čia detanderis dirba aukštesnių temperatūrų intervale, didesnis jo naudingumo koeficientas ir kartu efektyvesnis visas ciklas. Tačiau, norint pasiekti pakankamą šaldymo efektą, dujas reikia labiau suslėgti. Tokio įrenginio ir jo ciklo *T–s* diagramoje schema pavaizduota 14.15 pav.

Kompresoriuje *1* suslėgtos ir aušintuve *2* ataušintos iki pradinės temperatūros (procesas *1'–2'*) dujos paskirstomos į dvi dalis: viena dalis (*x*) nuosekliai teka šilumokaičiais *4* ir *5*, kur aušta pastoviame slėgyje (procesai *2'–4'* ir *4'–5'*), ir, tekėdamos pro ventilį *6*, droseliuojasi (procesas *5'–6'*); kita jų dalis (*1–x*) patenka į detanderį, kur plečiasi iki pradinio slėgio (procesas *2'–3'*).

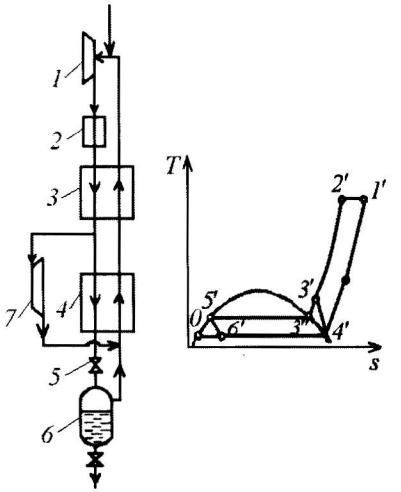
Po droseliavimo suskystėjusių dujų dalis (*y*) surenkama inde *7*, o nesuskystėjusių dujų dalis *(x–y)* teka per šilumokaitį *5*, jame pašyla (procesas *7'–3'*), maišosi su dujomis, atitekančiomis iš detanderio, ir šilumokaityje *4*, esant pastoviam slėgiui, įšyla iki pradinės temperatūros (procesas *3'–1'*).

Šio įrenginio specifinio šaldymo našumo lygtis analogiška Klodo ciklo lygčiai:

$$q_2 = y \cdot (h_1 - h_0) + q_n; \qquad (14.23)$$

čia y – suskystintųjų dujų dalis cikle, kg/kg; h_1, h_0 – dujų entalpijos ciklo taškuose *1* ir *0*, J/kg; q_n – šalčio nuostoliai, kJ/kg.

Mažo slėgio giliojo šaldymo ciklas (Kapicos ciklas). Šiame cikle vietoj stūmoklinio detanderio naudojamas efektyvesnis turbininis detanderis, kurio naudingumo koeficientas $\eta = 0{,}8$. Tokiame įrenginyje orui suskystinti reikia ne didesnio kaip 0,6 MPa slėgio. Naudojant turbininį detanderį ir turbininį kompresorių, galima pasiekti labai didelį agregato našumą. Tokio įrenginio schema ir jo darbo ciklas *T–s* diagramoje pateikti 14.16 pav.



14.16 pav. Mažo slėgio giliojo šaldymo įrenginio schema ir jo darbo ciklas *T–s* diagramoje: *1* – turbininis kompresorius, *2* – kompresoriaus aušintuvas, *3, 4* – šilumokaičiai, 5 – droselinis ventilis; *6* – suskystintųjų dujų indas; *7* – turbininis detanderis

Turbininiame kompresoriuje *1* suslėgtos ir aušintuve *2* iki pradinės temperatūros ataušintos dujos (procesas *1'–2'*) patenka į šilumokaitį *3*, kur aušta pastoviame slėgyje (procesas *2'–5'*). Iš šio šilumokaičio dalis dujų patenka į turbininį detanderį *7*, kur plečiasi (procesas *3'–4'*), o kita dalis patenka į šilumokaitį *4*, kur atšąla ir skystėja pastoviame slėgyje (procesas *3'–3''–5'*); paskui jos droseliuojasi ventilyje *5* (procesas *5'–6'*). Suskystėjusios dujos suteka į indą *6*, o nesuskystėjusios maišosi su dujomis iš detanderio ir teka šilumokaičiais *4* ir *3*, kur įšyla pastoviame slėgyje iki pradinės temperatūros (procesai *4'–7'* ir *7'–1'*).

Ciklo savitasis šaldymo našumas ir kiti jo rodikliai nustatomi taip pat kaip ir ankstesnio ciklo.

Giliojo šaldymo ciklų palyginimas. Palyginus nagrinėtų ciklų techninius rodiklius, nustatyta, kad ekonomiškiausias oro ir deguonies skystinimo ciklas yra didelio slėgio (iki 20,0 MPa) Heilandto ciklas. Jame savitosios energijos sąnaudos sudaro 1,2...1,4 kWh/kg skysto deguonies.

Didelio našumo giliojo šaldymo įrenginiams tinkamiausias yra vienkartinio droseliavimo ciklas, papildomai šaldant amoniaku.

Mažo slėgio Kapicos ciklui sunaudojama daugiau energijos, bet nereikia, kaip naudojant didelio slėgio įrenginius, pašalinti iš oro CO_2; be to, gaunamas švarus, neužterštas tepalais (kaip stūmoklinėse mašinose) skystas deguonis. Kadangi šis deguonis nėra visiškai grynas, tai jį galima naudoti techniniams reikalams.

Labai našiuose giliojo šaldymo įrenginiuose dujiniam azotui ir deguoniui gauti ekonomiškiausia naudoti dvigubo droseliavimo šaldant amoniaku ciklą ir vidutinio slėgio Klodo ciklą su detanderiu. Tokio šaldymo įrenginio energijos sąnaudos – 0,7...0,8 kWh/m^3 deguonies.

Nedidelio našumo (< 100 m^3/h deguonies) giliojo šaldymo įrenginiuose, nepaisant didelių specifinių energijos sąnaudų, gali būti taikomi ir vienkartinio droseliavimo ciklai, nes tokie įrenginiai nesudėtingi ir juos lengva eksploatuoti.

15 DALIS

GARINIMAS

15.1. Garinimo proceso teoriniai pagrindai

Virinant nelakių medžiagų, pvz., druskų, šarmų bei organinių medžiagų, tirpalus, esant mažam garų slėgiui, virimo temperatūroje išgaruoja tik tirpiklis.

Tirpalų koncentravimas, virinimo būdu išgarinant dalį tirpiklio ir pašalinant garus, vadinamas garinimu. Mažėjant tirpiklio kiekiui tirpale, tirpalo koncentracija didėja tol, kol tomis sąlygomis susidaro sotusis bei persotintasis tirpalas. Temperatūrose, žemesnėse už tirpiklio virimo temperatūrą, tirpiklis garuoja tik nuo tirpalo paviršiaus, o tirpalui verdant tirpiklis garuoja visame verdančio tirpalo tūryje, todėl yra intensyviau pašalinamas iš tirpalo. Dėl to realūs technologiniai procesai atliekami tirpalų virimo temperatūroje. Garinimo metu pašalinama tik dalis tirpiklio, kad produktas liktų takus. Dažnai gaunamas sotusis tirpalas, toliau iš sočiojo tirpalo šalinant tirpiklį ištirpusi medžiaga kristalizuojasi. Garinimu pramonėje dažniausiai iš tirpalų gaunamos druskos, o kai kada išskiriamas tirpiklis (pvz., gaunamas geriamasis vanduo arba iš techninio vandens garintuvuose pašalinamos druskos). Šis būdas dažnai derinamas su kitais skysčių išskyrimo ir koncentravimo būdais, pvz., su kristalizacija, adsorbcija, ekstrakcija bei rektifikacija.

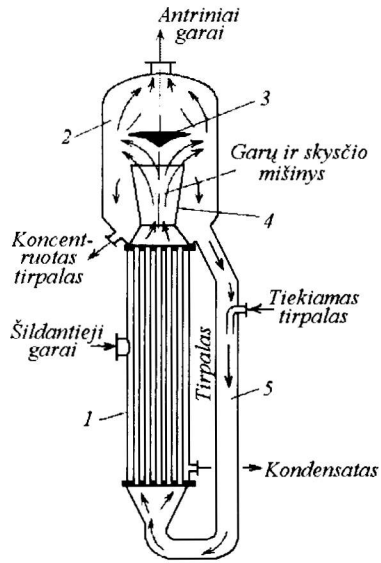
Kad tirpalas garuotų, šildalas turi perduoti jam savo šilumą, esant tarp jų temperatūrų skirtumui. Tiriant ir skaičiuojant garinimo procesus, šildalo ir tirpalo virimo temperatūrų skirtumas vadinamas naudingu temperatūrų skirtumu. Garintuvuose kaip šildalas dažniausiai naudojami sotieji vandens garai, kurie vadinami šildančiaisiais, arba pirminiais, tačiau gali būti naudojami ir kiti šildalai bei šildymo būdai.

Taigi garinimo metu vyksta tipinė šilumos pernaša nuo aukštesnės temperatūros šildalo verdančiam tirpalui. Garinama aparatuose, vadinamuose garintuvais (15.1 pav.). Šilumos atidavimas, kondensuojantis sotiesiems vandens garams ir verdant tirpalui, buvo nagrinėtas 12-oje vadovėlio dalyje.

Pramonėje dažniausiai garinami vandeniniai tirpalai, todėl toliau nagrinėsime tik jų garinimą. Pagrindiniai garinimo dėsningumai, skaičiavimo me-

todika ir aparatai iš esmės tinka ir tuomet, kai naudojamas bet kuris kitas tirpiklis.

Skiriamos šios garinimo stadijos: 1) tirpalo tiekimas į garintuvą; 2) tirpalo virinimas ir garinimas; 3) susidariusių garų pašalinimas (išmetant į atmosferą arba kondensuojant kondensatoriuose); 4) koncentruoto tirpalo pašalinimas iš garintuvo.



15.1 pav. Garintuvo su bendraaše ilgų vamzdžių šildymo kamera ir atskirai įrengtu cirkuliacijos vamzdžiu principinė schema: *1* – šildymo kamera, *2* – separatorius, *3* – purslų kreipiklis, *4* – virimo kamera, *5* – cirkuliacijos vamzdis

Garinimo ypatybes nusako trečioji stadija. Tirpalui šildyti ir virinti, kaip buvo minėta anksčiau, gali būti taikomas bet kuris žinomas šildymo būdas, bet dažniausiai šildoma vandens garais. Tokie garintuvai gaminami su dvigubomis sienelėmis, juose įrengiami apvalkaliniai, gyvatukiniai arba vamzdiniai šilumokaičiai, kurių vamzdžių vieną sienelės pusę liečia šildalas, o kitą plauna verdantis garinamasis tirpalas. Pagal tai, kaip pašalinami susidarantys garai, garinimo būdai skirstomi taip: a) garinimas esant atmosferos slėgiui; b) garinimas sudarius vakuumą; c) garinimas sudarius atitinkamą slėgį.

Garinimo būdas pasirenkamas pagal tirpalo fizikines ir chemines savybes bei proceso techninius ekonominius reikalavimus. Jeigu garinama, esant atmosferos slėgiui, susidarę vadinamieji antriniai garai pašalinami tiesiog į ap-

linką. Toks garinimo būdas yra paprastas, bet dėl didelių šilumos sąnaudų retai naudojamas.

Dažniausiai garinama, sudarius vakuumą. Šiuo atveju garai kondensuojami specialiuose kondensatoriuose, o nesusikondensavę – nusiurbiami vakuuminiais siurbliais (žr. 12.5.4 sk.). Garinant vakuume, sumažinama tirpalo virimo temperatūra, kas svarbu, kai garinamos aukštesnėje temperatūroje nepatvarios medžiagos (pvz., dauguma organinių medžiagų) ir medžiagos, kurių aukšta virimo temperatūra. Be to, sudarius vakuumą, galima padidinti šildančių (pirminių) ir susidariusių (antrinių) garų temperatūrų skirtumą ir kartu sumažinti šildymo įrenginių paviršių. Šio būdo trūkumas – didelės eksploatacijos išlaidos vakuumui sudaryti.

Kartais paranku garinti, sudarius atitinkamą slėgį. Šiuo atveju padidinama ne tik tirpalo virimo, bet ir susidarančių (antrinių) garų temperatūra, todėl šie garai gali būti panaudojami įvairiems technologiniams poreikiams kaip šildalas.

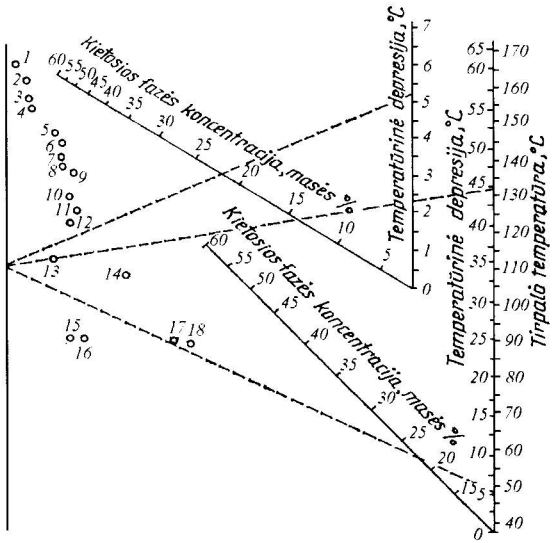
Šis garinimo būdas taikomas gana retai, nes į garintuvą reikia tiekti aukštos temperatūros šildalą, o tai yra susiję su eksploataciniais sunkumais ir didelėmis šilumos sąnaudomis. Be to, nemaža dalis garinimo būdu koncentruojamų medžiagų yra nepatvarios aukštose temperatūrose.

Kaip jau buvo minėta anksčiau, tirpalas garinamas esant virimo temperatūrai. Ji nusakoma *Raulio dėsniu,* kuris teigia, kad, *esant tai pačiai temperatūrai, tirpalo garų slėgis p lygus gryno tirpiklio garų slėgiui* p_o, *padaugintam iš tirpiklio molinės dalies x, t. y.* $p = p_0 \cdot x$.

Kuo didesnės koncentracijos tirpalas, tuo mažesnė tirpiklio molinė dalis ir žemesnis tirpalo garų slėgis. Kita vertus, žinome, jog tirpalas verda tada, kai tirpiklio garų slėgis tampa lygus aplinkos slėgiui. Iš čia nesunku padaryti bandymais patvirtintą išvadą, kad tirpalo virimo temperatūra tuo aukštesnė už gryno tirpiklio virimo temperatūrą, kuo didesnė jo koncentracija (15.2 pav.).

Temperatūrinė depresija (15.2 pav.) atmosferos slėgyje nustatoma taip. Žinyne parenkama tiriamojo tirpalo žinomos koncentracijos virimo temperatūra. Per tarp vertikaliųjų ašių esantį medžiagą atitinkantį tašką ir iš žinyno paimto tirpalo koncentraciją viršutinėje pasvirusioje ašyje brėžiama tiesė iki susikirtimo su kairiąja vertikaliąja ašimi. Per gautą tašką ir tirpalo, kurio nustatoma temperatūrinė depresija, koncentraciją brėžiamos dvi tiesės, kurių viena susikerta su apatine pasvirusia koncentracijos ašimi, o kita – su viršutine pasvirusia koncentracijos ašimi. Pratęsus šias tieses iki susikirtimo su temperatūrinių depresijų vertikaliosiomis ašimis, nustatomos dvi temperatūrinės depresijos vertės ir jų vidurkis prilyginamas tiriamos tirpalo koncentracijos temperatūrinei depresijai.

Temperatūros nuostoliai. Šie nuostoliai garinimo aparatuose susidaro dėl temperatūrinės arba fizikinės cheminės Δ_1, hidrostatinės Δ_2 ir hidraulinės Δ_3 depresijų.



15.2 pav. Kai kurių vandeninių tirpalų virimo temperatūros padidėjimas – temperatūrinė depresija: *1* – sacharozė, *2* – citrinų rūgštis, *3* – sulfitiniai žlaugtai, *4* – glicerinas, *5* – natrio nitratas, *6* – amonio sulfatas, *7* – kalio karbonatas, *8* – kalcio nitratas, *9* – kalio chloridas, *10* – azoto rūgštis, *11* – ličio nitratas, *12* – sieros rūgštis, *13* – kalcio chloridas, *14* – natrio chloridas, *15* – natrio šarmas, *16* – kalio šarmas, *17* – ličio chloridas, *18* – magnio chloridas

Tirpalo ir tirpiklio virimo temperatūrų t ir t_0 skirtumas vadinamas *temperatūrine depresija* Δ_1:

$$\Delta_1 = t - t_0 .$$

Šios depresijos skaitinė vertė priklauso nuo ištirpusios medžiagos ir tirpiklio savybių arba cheminės kilmės, taip pat nuo ištirpusios medžiagos koncentracijos ir slėgio virš tirpalo. Kuo didesnis slėgis, tuo didesnė temperatūrinė depresija.

Žinodami depresiją, esant atmosferos slėgiui Δ_{atm}, depresiją Δ_1, esant kitokiam slėgiui, galime apskaičiuoti pagal apytikslę *Tiščenkos lygtį:*

$$\Delta_1 = 16{,}2 \cdot \frac{T^2}{r} \cdot \Delta_{atm};$$

čia T – vandens virimo ir kondensacijos temperatūra, K; r – garų susidarymo šiluma, J/kg, esant nurodytajam slėgiui.

Hidrostatinė depresija Δ_2. Kadangi apatinio sluoksnio tirpalo garai turi papildomai nugalėti viršutinių sluoksnių hidrostatinį slėgį, tai apatiniai tirpalo

sluoksniai garintuvuose užverda šiek tiek aukštesnėje temperatūroje negu viršutiniai. Sluoksnių virimo temperatūrų skirtumą nusako hidrostatinė depresija (dažniausiai 1...3 °C). Hidrostatinė depresija Δ_2 apskaičiuojama taip:

$$\Delta_2 = t_{vid} - t_a ;$$

čia t_{vid} – tirpalo virimo temperatūra garintuvo vamzdžių viduriniame skerspjūvyje pagal aukštį, esant slėgiui p_{vid}; t_a – antrinių garų, esančių virš verdančio tirpalo, temperatūra, esant slėgiui virš tirpalo p_a.

Slėgis viduriniame vamzdžių skerspjūvyje apskaičiuojamas taip:

$$p_{vid} = p_a + H \cdot \rho_{miš} \cdot g / 2;$$

čia H – garintuvų šildymo kameros vamzdžių aukštis, m; $\rho_{miš}$ – vamzdžiuose esančio tirpalo ir garų mišinio tankis, kg/m^3.

Apytiksliai skaičiuojant galima tarti, kad verdančiame tirpale garų dalis $\varepsilon = 0{,}5$, t. y. tirpalo ir garų mišinio tankis $\rho_{miš}$ lygus pusei tirpalo tankio ρ_{sk}, t. y. $\rho_{miš} \approx \rho_{sk}/2$. Tuomet

$$p_{vid} = p_a + H \cdot \rho_{sk} \cdot g / 4.$$

Hidraulinė depresija Δ_3 susidaro dėl garų slėgio nuostolių vamzdžiuose, jungiančiuose aparatus. Ši depresija paprastai yra apie 0,5...1,5 °C.

Skaičiuojant vieno korpuso garintuvus, atsižvelgiama į temperatūrinę (kartais vadinamą koncentravimo) ir hidrostatinę depresijas, o skaičiuojant daugiakorpusius garintuvus reikia atsižvelgti ir į hidraulinę depresiją.

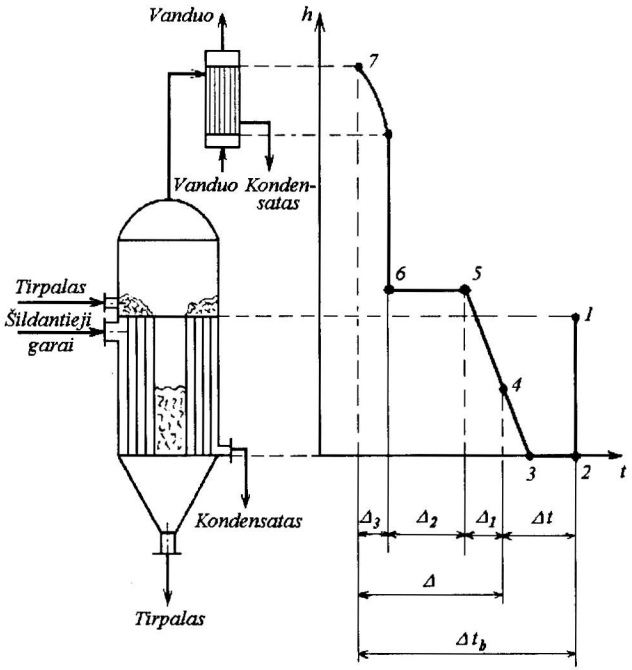
Abscisėje (15.3 pav.) atidėta temperatūros, o ordinatėje – atitinkamas temperatūras turinčių taškų padėtis sistemoje. Pvz., taškas *4* atitinka tirpalo vidurinio sluoksnio temperatūrą, o skirtumas tarp taškų *4* ir *7* apibūdina temperatūros nuostolius sistemoje (visų rūšių depresijas). Atitinkamai šildančiųjų garų temperatūros (taškas *1*) ir tirpalo virimo temperatūros (taškas *4*) skirtumas yra naudingas temperatūrų skirtumas.

Bendroji temperatūrinė depresija Δ garinimo aparatuose lygi temperatūrinės, hidrostatinės ir hidraulinės depresijų sumai (žr. 15.3 pav.):

$$\Delta = \Delta_1 + \Delta_2 + \Delta_3 . \qquad (15.1)$$

Kadangi bendroji tirpalo depresija Δ reiškia tirpalo virimo temperatūros t ir susidariusių antrinių garų temperatūros t' skirtumą, tai tirpalo virimo temperatūrą galima apskaičiuoti taip:

$$\Delta = t - t'; \quad \text{iš čia} \quad t = t' + \Delta .$$



15.3 pav. Vienkorpusio garintuvo schema ir temperatūrų grafikas:
1 – šildančiųjų garų temperatūra, *2* – pirminių garų kondensacijos temperatūra, *3* – tirpalo apatinio sluoksnio virimo temperatūra, *4* – tirpalo vidurinio sluoksnio virimo temperatūra, *5* – tirpalo viršutinio sluoksnio virimo temperatūra, *6* – antrinių garų temperatūra, *7* – antrinių garų kondensacijos temperatūra

Verdant tirpalui, antrinių garų temperatūra nesikeičia, o tirpalo virimo temperatūra t_1 padidėja depresijos dydžiu Δ, todėl garintuvo naudingas temperatūrų skirtumas

$$\Delta t = t_1 - t = t_1 - t' - \Delta = \Delta t_b - \Delta ; \qquad (15.2)$$

čia Δt_b – bendras temperatūrų skirtumas, lygus šildalo ir antrinių garų kondensacijos kondensatoriuje temperatūrų skirtumui.

Garintuvuose naudingas temperatūrų skirtumas yra mažesnis už bendrą temperatūrų skirtumą bendros depresijos dydžiu. Iš čia galime padaryti išvadą, kad dėl depresijos sumažėja naudingas temperatūrų skirtumas arba padidėja temperatūros nuostoliai, todėl ši depresija dažnai vadinama temperatūros nuostoliais. Garintuvo naudingas temperatūrų skirtumas Δt reiškiamas pirminių (šildančiųjų) garų temperatūros t_1 ir antrinių garų kondensacijos temperatūros

t' bei temperatūros nuostolių Δ skirtumu. Kai sistemoje yra keli garintuvai, tai naudingas temperatūrų skirtumas analogiškai išreiškiamas taip:

$$\Delta t = t_1 - t'_n - \Sigma\Delta = \Delta t_b - \Sigma\Delta; \qquad (15.2a)$$

čia t_1 – šildalo (pirminių garų) temperatūra, °C; t_n – paskutinio (n-ojo) aparato antrinių sočiųjų garų kondensacijos temperatūra, °C; $\Sigma\Delta$ – temperatūros nuostolių visuose garintuvuose suma, °C.

15.2. Garintuvų skaičiavimas

Garintuvus sudaro šildymo kamera arba virintuvas (dažniausiai vamzdžių pluoštas) *1* ir separatorius *4*, skirtas tirpalo lašeliams atskirti nuo antrinių garų, susidarančių verdant tirpalui (15.1 pav. ir 15.4 pav.).

Į garintuvų skaičiavimą įeina skaičiavimai pagal medžiagų ir šilumos balansus bei aparatų konstrukcinių elementų, pvz., šildymo kameros ir šilumokaičio šilumos mainų paviršiaus, skaičiavimai.

Medžiagų balansas rodo ryšį tarp garinimo procese dalyvaujančių medžiagų kiekių ir jų koncentracijų. Pagal šį balansą galima apskaičiuoti išgarinto vandens arba gatavo produkto kiekį, pradinio ir sukoncentruoto tirpalo koncentracijas bei kitus dydžius.

Tirpalo kiekį prieš garinimą ir po garinimo atitinkamai pažymėkime G_1 ir G_2, tirpalo koncentracijas prieš garinimą ir po jo – a_1 ir a_2, išgarinto vandens (tirpiklio) kiekį – W.

Laikydami, kad garinimo metu nuostoliai nesusidaro, visų garinimo procese dalyvaujančių medžiagų balanso lygtį užrašome taip:

$$G_1 = G_2 + W. \qquad (15.5)$$

Ištirpusios medžiagos balanso lygtis yra

$$G_1 \cdot a_1 = G_2 \cdot a_2. \qquad (15.6)$$

Iš šių dviejų lygčių galima apskaičiuoti bet kuriuos du dydžius, kai kiti trys yra žinomi. Paprastai būna žinoma G_1, a_1, a_2. Tada, išsprendę (15.5) ir (15.6) lygtis, gauname:

$$G_2 = G_1 \cdot \frac{a_1}{a_2}; \quad a_2 = {G_1 \cdot a_1}\Big/{(G_1 - W)}, \qquad (15.7)$$

$$W = G_1 - G_2 = G_1 \cdot \left(1 - \frac{a_1}{a_2}\right). \qquad (15.8)$$

Pagal *šilumos balanso* lygtį galima apskaičiuoti garinimui reikalingą šildalo (pirminių garų) kiekį. Į garintuvą įtekėję ir iš jo ištekėję srautai (15.4 pav.) pateikti 15.1 lentelėje.

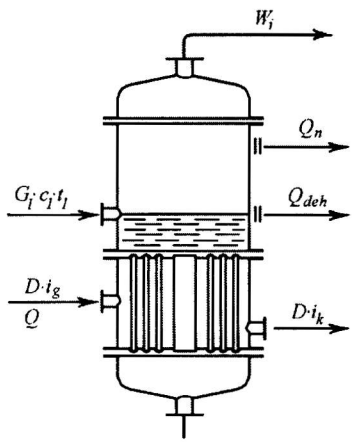
15.1 lentelė. Garintuvo šilumos balansas

Gauta šiluma	Sunaudota šiluma
Su šildalu $Q=D\cdot h_p$	Su antriniu garu $W\cdot h_a$
Su tiekiamu tirpalu $G_1\cdot c_1\cdot t_1$	Su ištekančiu tirpalu $G_2\cdot c_2\cdot t_2$
	Su šaldalo kondensatu $D\cdot c_k\cdot t_k$
	Dėl dehidratacijos Q_{deh}
	Šilumos nuostoliai Q_n

Šilumos balansą galime užrašyti tokia lygtimi:

$$Q+G_1\cdot c_1\cdot t_1=W\cdot h+G_2\cdot c_2\cdot t_2+Q_{deh}+Q_n; \qquad (15.9)$$

čia c_1 ir c_2 – įtekančio ir ištekančio tirpalo savitoji specifinė šiluma, J/(kg K); t_1 ir t_2 – įtekančio ir ištekančio tirpalo temperatūra, °C; h – antrinių garų entalpija, J/kg .



15.4 pav. Garintuvų šilumos srautų schema

Šią lygtį pertvarkome. Įtekantį tirpalą sudaro gatavo produkto ir išgarinto vandens mišinys, todėl galima tokia lygtis:

$$G_1\cdot c_1\cdot t_1=G_2\cdot c_2\cdot t_2+W\cdot c_w\cdot t_w; \qquad (15.10)$$

čia t_w – išgarinto vandens temperatūra, °C; c_w – vandens savitoji specifinė šiluma, J/(kg·K).

Laikant, kad temperatūros yra vienodos, t. y. $t_1 = t_2 = t_w$, galima parašyti:

$$G_2 \cdot c_2 = G_1 \cdot c_1 - W \cdot c_w . \qquad (15.11)$$

Įrašę sandaugos $G_2 \cdot c_2$ vertę į (15.9) lygtį ir ją pertvarkę, gauname:

$$Q = G_1 \cdot c_1 \cdot (t_2 - t_1) + W \cdot (h - c_w \cdot t_2) + Q_{deh} + Q_n . \qquad (15.12)$$

Šios lygties pirmasis narys $G_1 \cdot c_1 \cdot (t_2 - t_1)$ rodo, kiek šilumos sunaudojama tirpalui pašildyti iki virimo temperatūros t_2, o antrasis narys $W \cdot (h - c_v \cdot t_2)$ – šilumą, reikalingą vandeniui išgarinti.

Tirpalo savitoji specifinė šiluma apskaičiuojama pagal adityvumo dėsnį:

$$c = c_s \cdot a + c_v \cdot (1 - a);$$

čia c_s – sausos bevandenės medžiagos savitoji specifinė šiluma, J/(kg K); a – tirpalo koncentracija, išreikšta ištirpusios medžiagos masės dalimis.

Antrinių garų entalpija h_a lygi sočiųjų vandens garų entalpijai, parinktai pagal slėgį garintuve.

Pagal (15.12) lygtį apskaičiavę vandeniui išgarinti sunaudojamos šilumos kiekį Q, randame tam reikalingą pirminių garų kiekį D:

$$Q = D \cdot (h_g - h_k);$$

iš čia $$D = \frac{Q}{(h_g - h_k)} . \qquad (15.13)$$

Apytiksliai skaičiuojant laikoma, kad tiekiami garai yra sotūs, o iš aparato pašalinamo kondensato temperatūra lygi garų kondensacijos temperatūrai. Tuomet lygtis garų kiekiui D apskaičiuoti supaprastėja:

$$D \approx Q/r;$$

čia h_g – šildančiojo garo entalpija, J/kg; h_k – kondensato entalpija, kurios skaitinė vertė lygi kondensato temperatūros ir savitosios specifinės šilumos sandaugai, J/kg; r – tirpiklio (vandens) garavimo šiluma, J/kg.

Jeigu garintuvo izoliacija gera, tai šilumos nuostolių (Q_n) nėra, o kadangi šilumos sąnaudos dehidratacijai Q_{deh} gerokai mažesnės už kitas šilumos sąnaudas, tai ir jų galima nepaisyti. Tuomet į garintuvą tiekiant iki virimo temperatūros pašildytą tirpalą, šilumos balanso lygtis (15.12) supaprastėja ir užrašoma taip:

$$D \cdot (h_p - c_k \cdot t_k) = W \cdot (h_a - c_v \cdot t_p) .$$

Garintuvo darbo efektyvumui palyginti vartojamas terminas *savitosios pirminių garų sąnaudos d*, tai garų sąnaudos, kg, kilogramui tirpiklio išgarinti. Jos apskaičiuojamos pagal tokią lygtį:

$$d = D/W = (h_a - c_v \cdot t_p)/(h_p - c_k \cdot t_k) = r/r_p \; ; \qquad (15.13a)$$

čia h_p – pirminių garų entalpija, J/kg; h_a – antrinių garų entalpija, J/kg; c_v ir c_k – vandens ir pirminių garų kondensato savitosios specifinės šilumos, J/(kg·K); t_p ir t_k – pradinė garinamo tirpalo ir pirminių garų kondensacijos temperatūros, °C; r ir r_p – tirpiklio (vandens) garavimo šiluma garinimo temperatūroje ir pirminių garų kondensacijos (garų susidarymo) šiluma, J/kg.

Kai šildoma sočiaisiais vandens garais ir garinamas vandeninis tirpalas, tai $r \approx r_p$ ir tuomet $d = 1$, t. y. vienas kilogramas pirminių garų išgarina vieną kilogramą vandens (tirpiklio). Praktiškai dėl šilumos nuostolių ir šilumos, sunaudojamos tirpalui pašildyti iki virimo temperatūros, vienam kilogramui vandens išgarinti sunaudojama *1,1...1,2* kg pirminių garų.

Garintuvo šildymo kameros šildomasis paviršius apskaičiuojamas pagal pagrindinę šilumos perdavimo lygtį, kurioje vidutinis temperatūrų skirtumas pakeičiamas naudingu temperatūrų skirtumu:

$$Q = k \cdot F \cdot \Delta t.$$

Ji perrašoma taip, kad tiktų garinimo aparatams:

$$D \cdot (h_g - h_k) = k \cdot F \cdot \Delta t \; .$$

Iš čia

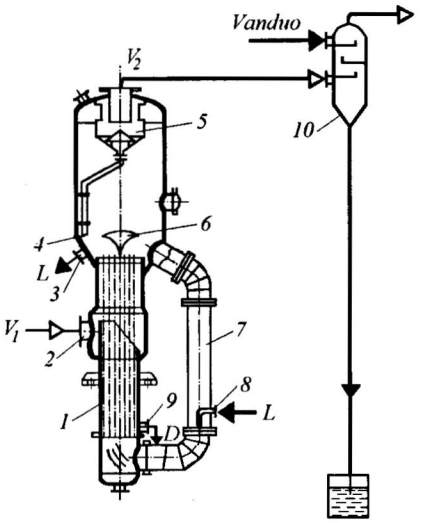
$$F = \frac{D \cdot (h_g - h_k)}{k \cdot \Delta t}; \qquad (15.14)$$

čia Δt – naudingas temperatūrų skirtumas (žr. (15.2) lygtį).

15.3. Garinimo būdai. Garinimo proceso principinės schemos

Pagal antrinių garų panaudojimą garinimas skirstomas į vienkartinį, daugkartinį ir garinimą naudojant šiluminį siurblį. Pagal darbo režimą garinimas gali būti periodinis ir nuolatinis. Vienkartinis garinimas būna ir periodinis, ir nuolatinis, o daugkartinis – tik nuolatinis. Nuolatinis garinimo procesas visada ekonomiškesnis už periodinį ir naudojamas esant dideliam gamybos našumui.

Vienkartinis garinimas taikomas nedidelio našumo garintuvuose ir kai susidaro didelė garinamųjų tirpalų depresija. Vienkartinis garinimas atliekamas, esant atmosferos slėgiui, sudarius vakuumą arba papildomą slėgį. Vienkartinio vakuuminio garinimo schema pateikta 15.5 pav.



15.5 pav. Vienkartinio vakuuminio garinimo schema:
1 – šildymo kamera, *2* – šildančiojo garo tiekimo atvamzdis, *3* – nugarinto (koncentruoto) tirpalo išleidimo atvamzdis, *4* – separatorius, *5* – skysčio lašų skirtuvas, *6* – skysčio ir garų srautų kreipiamosios pertvaros, *7* – cirkuliacijos vamzdis, *8* – pradinio tirpalo tiekimo atvamzdis, *9* – kondensato išleidimo atvamzdis, *10* – barometrinis kondensatorius

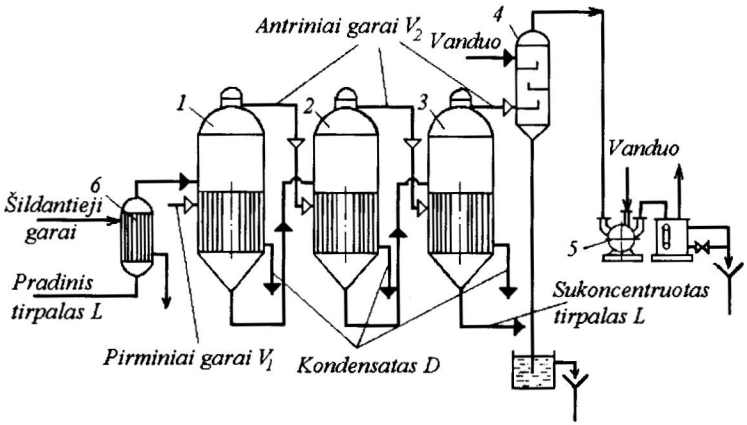
Visose garinimo aparatų schemose tirpalo srautas žymimas raide L, pirminių ir antrinių garų srautai – V_1 ir V_2, kondensato – D.

Pradinis tirpalas per atvamzdį *8* patenka į garintuvo šildymo kamerą *1*. Į apatinę garintuvo dalį, primenančią šilumokaitį, tiekiamas šildalas V_1 (dažniausiai vandens garai, t. y. pirminiai garai). Garintuve tirpalas virinamas, o susidarę garai V_2 (antriniai garai), perėję per separatorių *4* ir skysčio lašų skirtuvą *5*, patenka į barometrinį kondensatorių *10*. Čia garus kondensuoja iš viršaus tekantis vanduo. Kondensatas kartu su vandeniu išteka barometriniu vamzdžiu. Kondensatoriuje *10* nesukondensuoti garai, o kartu su jais ir oras bei kitos dujos patenka į skysčio lašų skirtuvą ir iš čia nusiurbiami vakuuminiu siurbliu (paveiksle jie neparodyti). Nugarintas tirpalas iš garintuvo atvamzdžiu *3* teka į produkto rezervuarą.

Dėl didelių šilumos sąnaudų ir mažo aparato našumo vienkartinis garinimas retai naudojamas.

Daugkartinis garinimas nuo vienkartinio skiriasi pirmiausia tuo, kad antriniai garai panaudojami tolesniame garintuve kaip šildalas; nepanaudojami ir išleidžiami į kondensatorių tik antriniai garai iš paskutinio korpuso

(15.6 pav.). Be to, tirpalas iš vieno garintuvo leidžiamas į kitą aparatą. Jis teka savitaka arba pumpuojamas siurbliu.



15.6 pav. Pasrovinė daugkartinio garinimo, pradžioje pašildant tirpalą, schema: *1*, *2*, *3* – garintuvai su centriniu cirkuliacijos vamzdžiu, *4* – barometrinis kondensatorius, *5* – vakuuminis siurblys, *6* – pradinio tirpalo pašildymo iki virimo temperatūros šilumokaitis

Teoriškai dėl tokio daugkartinio antrinio garo panaudojimo sumažėja šilumos sąnaudos vienam kilogramui tirpiklio išgarinti tiek kartų, kiek sistemoje yra garintuvų. Pavyzdžiui, jeigu vieno korpuso garinimo sistemoje vienam kilogramui vandens išgarinti reikia vieno kilogramo šildančiųjų garų, tai trijų korpusų garinimo sistemoje jo reikės maždaug tris kartus mažiau, t. y. tik 0,33 kg. Tačiau praktiškai vienam kilogramui vandens išgarinti šildančiųjų garų sunaudojama daugiau.

Vienas įrenginys neturėtų turėti labai daug korpusų, nes kiekviename tokiame korpuse mažėja naudingasis temperatūrų skirtumas, didėja šilumos nuostoliai, o kartu ir garų sąnaudos. Didinant garintuvų skaičių vienoje sistemoje, galima ne tik nesutaupyti šilumos, bet priešingai – šilumos sąnaudos tam pačiam kiekiui vandens išgarinti taps didesnės, negu esant mažesniam aparatų skaičiui. Geriausia, kai korpusų yra 2...3 (optimalus skaičius); daugiau kaip penkių korpusų garinimo sistemos retai naudojamos. Garintuvai pradedami numeruoti nuo to, į kurį tiekiami pirminiai garai.

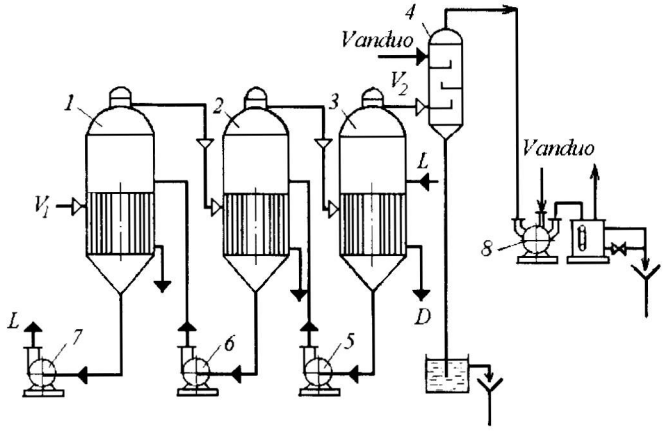
Dalis kiekviename aparate susidariusių antrinių garų gali būti tiekiama į kitus korpusus kaip šildalas, o dalis panaudojama kitiems reikalams, nesusijusiems su garinimu. Šie garai vadinami *ekstragarais*. Jie gali būti imami iš bet kurio sistemos korpuso, išskyrus paskutinį, nes jo visi garai tiekiami į kondensatorių.

Daugkartinio garinimo procese, kai antriniai garai vartojami kaip šildalas, t. y. kaip pirminiai garai, visuose korpusuose tirpalų virimo temperatūra turi būti skirtinga. Be to, tolesniame korpuse virimo temperatūra turi būti mažesnė negu ankstesniame, antraip pirmojo korpuso antriniai garai, leidžiami į tolesnį korpusą kaip šildalas, negalės užvirinti šiame korpuse esančio tirpalo. Paprastai daugkartinio garinimo sistemos pirmuosiuose korpusuose būna atmosferos arba didesnis slėgis, o tolesniuose – vakuumas.

Į daugkartinio garinimo aparatus garai ir garinamasis tirpalas gali būti tiekiami įvairiai. Plačiausiai taikoma tokia garinimo schema, kai pradinis tirpalas ir pirminiai garai teka pasroviui (15.6 pav.). Pradinis tirpalas tiekiamas į pirmąjį korpusą, iš jo – į antrąjį, o paskui – į trečiąjį. Pirmajame korpuse susidarę antriniai garai patenka į antrojo korpuso apatinę dalį – šilumokaitį – kaip šildalas; iš šio – į trečiąjį korpusą. Iš paskutinio, t. y. trečiojo, korpuso antriniai garai teka į kondensatorių ir jame kondensuojasi. Taigi, tirpalo ir garų judėjimo kryptys sutampa. Tirpalas iš vieno korpuso į kitą savitaka teka tik tada, kai slėgis šiuose korpusuose nuosekliai mažėja. Iš pirmesnio korpuso tirpalas patenka šiek tiek perkaitintas, todėl iki tirpalo virimo temperatūros jis atvėsta šiame korpuse ir kartu išgarina tam tikrą kiekį tirpiklio (savaiminis garavimas). Į pirmąjį korpusą stengiamasi tiekti ekstragarais arba kondensatu pašildytą tirpalą (geriausia iki tirpalo virimo temperatūros).

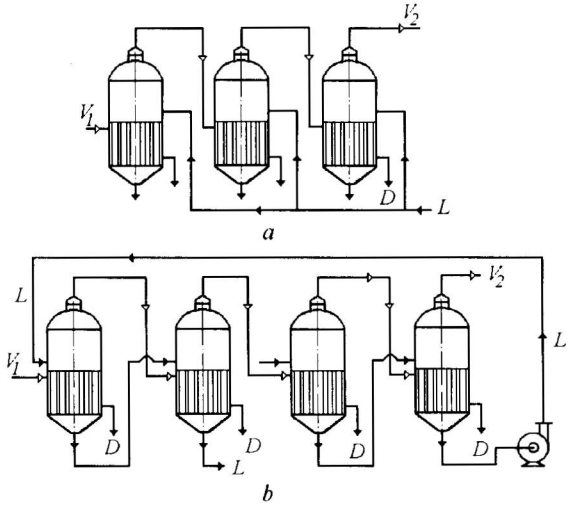
Šios schemos trūkumas yra tas, kad į kiekvieną kitą korpusą, mažėjant slėgiui virš tirpalo, patenkančių šildančiųjų garų ir vis labiau koncentruoto tirpalo temperatūra nuosekliai mažėja, kartu didėja šio tirpalo klampa, mažėja šilumos perdavimo koeficientas ir blogėja šilumos mainai, todėl mažėja naudingasis temperatūrų skirtumas. Šio trūkumo išvengiama tiekiant pradinį tirpalą ir šildalą priešsroviniu būdu. Kaip pavaizduota 15.7 pav., praskiestas tirpalas tiekiamas į paskutinį, t. y. į trečiąjį, korpusą, iš šio – į antrąjį, o paskui – į pirmąjį. Iš pirmojo korpuso iki norimo laipsnio išgarintas tirpalas, t. y. gatavas produktas, pašalinamas iš sistemos. Kadangi tirpalas iš korpuso, kuriame yra mažesnis slėgis (pvz., iš trečiojo), turi patekti į korpusą, kuriame slėgis yra didesnis (pvz., į antrąjį), tai jį reikia transportuoti siurbliais.

Dirbant pagal šią schemą didžiausia tirpalo koncentracija yra pirmajame korpuse; jame yra ir aukščiausia šildalo (garų) temperatūra. Tai turi teigiamos įtakos šilumos mainams, nes visuose korpusuose šilumos perdavimo koeficientų vertės yra beveik vienodos (priešingai negu pasroviniuose aparatuose). Be to, garinimo proceso pranašumu laikoma tai, kad paskutiniame korpuse antrinių garų išsiskiria mažiau, negu dirbant pagal 15.6 pav. pateiktą schemą, todėl mažiau apkraunamas kondensatorius ir kartu susidaro palankesnės sąlygos vakuumui sudaryti. Šilumos sąnaudos, dirbant vienu (15.6 pav.) ir kitu (15.7 pav.) būdu, nedaug skiriasi. Didelis priešsrovinės schemos trūkumas yra tai, kad čia būtinai reikalingi siurbliai.



15.7 pav. Priešsrovinė daugkartinio garinimo schema:
1, *2*, *3* – korpusai, *4* – barometrinis kondensatorius, *5*, *6*, *7* – siurbliai,
8 – vakuuminis siurblys

Be priešsrovinės ir pasrovinės garinimo schemų, gali būti naudojamos lygiagretaus arba mišraus tirpalo tiekimo į korpusus schemos. Schema, kai praskiestas tirpalas tiekiamas lygiagrečiai į visus tris korpusus, pavaizduota 15.8 pav., *a*. Tuomet iš kiekvieno korpuso gaunamas sukoncentruotas, bet



15.8 pav. Daugiakorpusių garintuvų schemos:
a – lygiagretieji srautai, *b* – mišrusis būdas

skirtingos koncentracijos tirpalas. Pagal šią schemą garinamos, pavyzdžiui, greitai besikristalizuojančios medžiagos, nes, perpilant jų tirpalus iš vieno korpuso į kitą dėl kristalizacijos gali užsikimšti vamzdžiai.

Garinimo schema, kai tirpalas tiekiamas mišriuoju būdu, pavaizduota 15.8 pav., *b*.

Daugiakorpusių garintuvų medžiagų ir šilumos balansai. Daugiakorpusių garintuvų medžiagų ir šilumos balansai užrašomi iš kiekvieno korpuso atitinkamų balansų lygčių sudarytomis sistemomis.

Pagal medžiagų balanso lygčių sistemą apskaičiuojamas bendras sistemoje išgarinto tirpiklio kiekis ir tirpalo koncentracija po kiekvieno korpuso. Tirpalo koncentracijai po kiekvieno korpuso apskaičiuoti reikia pasirinkti kiekviename korpuse išgarinamų tirpiklio kiekių santykį; dažniausiai rekomenduojamas $W_1:W_2:W_3 = 1:1,1:1$. Atskiruose korpusuose išgarintiems tirpiklio kiekiams apskaičiuoti reikia žinoti bendrą išgarinto tirpiklio kiekį, kuris gali būti apskaičiuotas pagal (15.15) lygtį:

$$W_b = G_0 \cdot \left(1 - a_0/a_g\right); \tag{15.15}$$

$$W_b = \sum_{i=1}^{i=n} W_i \; ; \tag{15.16}$$

$$\mathrm{a_n = G_{n-1} \cdot a_{n-1}/\left(G_{n-1} - W_n\right) =}$$

$$\mathrm{= G_0 \cdot a_0 \Big/ \left(G_0 - \sum_{i=1}^{i=n} W_i \right)}; \tag{15.17}$$

čia G_0, G_{n-1} – atitinkamai į pirmąjį ir n-ąjį korpusą tiekiamo tirpalo debitai, kg/s; W_b, W_i, ir W_n – bendras ir visos sistemos i-ajame ir n-ajame korpusuose išgarinto tirpiklio (antrinių garų) debitas, kg/s; a_0, a_g arba a_n, a_{n-1} – atitinkamai į pirmąjį sistemos korpusą tiekiamo, iš paskutinio sistemos korpuso ištekančio ir $n-1$ korpuse sukoncentruoto tirpalo koncentracijos, kg/kg.

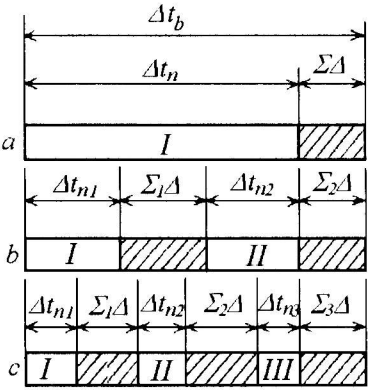
Sukoncentruoto tirpalo koncentraciją a_g (a_n) galima apskaičiuoti pagal (15.7) lygtį.

n-ojo korpuso šilumos balanso lygtis, neatsižvelgiant į ekstragarų ėmimą, gali būti užrašyta taip:

$$W_{n-1} \cdot h_{n-1} + G_{n-1} \cdot h_{t(n-1)} = \\ = G_n \cdot h_{tn} + W_{n-1} \cdot h_{k(n-1)} + W_n \cdot h_{nag} + Q_{nn}; \tag{15.18}$$

čia W_{n-1} ir W_n – šildančiųjų ir antrinių garų debitas n-ajame korpuse, kg/s; G_{n-1}, G_n – į n-ąjį korpusą įtekančio ir iš jo ištekančio tirpalo debitas, kg/s; h_{n-1}, h_{nag} – n-ojo korpuso šildančiųjų ir antrinių garų entalpija, J/kg; $h_{t(n-1)}$, h_{tn}, $h_{k(n-1)}$ – į n-ąjį korpusą įtekančio ir iš jo ištekančio tirpalo bei iš n-ojo korpuso ištekančių šildančiųjų garų kondensato entalpija, J/kg; Q_{nn} – šilumos nuostoliai į aplinką iš n-ojo korpuso, W.

Užrašius visų korpusų šilumos balanso lygtis (pagal (15.18)) ir balanso lygtį pagal išgarintą tirpiklio kiekį (15.16), apskaičiuojamas šildančiųjų garų debitas pirmajame korpuse ir išgarinto tirpiklio debitai kiekviename korpuse. Pagal apskaičiuotus išgarinto tirpiklio kiekius ir pirmajame korpuse sunaudoto šildalo kiekius apskaičiuojami į atskirus korpusus tiekiami šilumos srautai bei atskirų korpusų šilumos mainų paviršius. Todėl reikia žinoti naudingą temperatūrų skirtumą atskiruose korpusuose.



15.9 pav. Temperatūros nuostolių ir naudingojo temperatūrų skirtumo pasiskirstymas garintuvuose: *a* – (vienas korpusas) Δt_n, *b* – (du korpusai) $\Delta t_1 + \Delta t_2$, *c* – (trys korpusai) $\Delta t_1 + \Delta t_2 + \Delta t_3$; *I, II, III* – vieno, dviejų ir trijų korpusų garinimo aparatai; t_1, t' – pirmąjį korpusą šildančių garų (pirminių garų) ir antrinių garų, patenkančių iš paskutinio korpuso į kondensatorių, temperatūra, °C (laikoma, kad temperatūros nuostoliai visuose korpusuose yra vienodi)

Naudingas temperatūrų skirtumas daugiakorpusiame garintuve ir jo pasiskirstymas pagal korpusus. Daugiakorpusio garintuvo suminis naudingasis temperatūrų skirtumas $\sum \Delta t_n$ apskaičiuojamas pagal lygtį

$$\sum \Delta t_n = \Delta t_b - \sum \Delta ; \qquad (15.19)$$

čia Δt_b – bendras temperatūrų skirtumas daugiakorpusiame garintuve, lygus pirmojo korpuso šildančiųjų garų temperatūros $t_š$ ir antrinių garų tiekiamų iš paskutinio korpuso į barometrinį kondensatorių, temperatūros $t_{b,k}$ skirtumui:

$$\Delta t_b = t_š - t_{b,k} . \qquad (15.20)$$

(15.19) priklausomybėje apibūdina suminius temperatūros nuostolius visuose daugiakorpusio garintuvo korpusuose:

$$\sum \Delta = \sum_{i=1}^{n} \Delta_{1,i} + \sum_{i=1}^{n} \Delta_{2,i} + \sum_{i=1}^{n} \Delta_{3,i} . \qquad (15.21)$$

Naudingojo temperatūrų skirtumo paskirstymas. Jeigu turime daugiakorpusį garintuvą, tai, skaičiuojant garintuvo šildymo paviršiaus plotą, reikia atitinkamai paskirstyti naudingąjį temperatūrų skirtumą. Paprastai atskiriems korpusams jis paskirstomas taip, kad:

a) visų korpusų šilumos mainų paviršiaus plotas būtų vienodas;

b) bendras (suminis) garintuvo šilumos mainų paviršiaus plotas būtų mažiausias.

Panagrinėsime, kaip paskirstomas naudingasis temperatūrų skirtumas, kad visų korpusų šilumos mainų paviršiaus plotas būtų *vienodas*. Šiuo atveju $F_1 = F_2 = ... = F_n = F$.

Naudingasis temperatūrų skirtumas kiekviename korpuse

$$\Delta t_1 = \frac{Q_1}{k_1} \cdot \frac{1}{F}; \quad \Delta t_2 = \frac{Q_2}{k_2} \cdot \frac{1}{F}; \quad \Delta t_n = \frac{Q_n}{k_n} \cdot \frac{1}{F}. \qquad (15.22)$$

Sudėję lygčių kairiąsias ir dešiniąsias puses, gausime suminį naudingąjį temperatūrų skirtumą Δt:

$$\Delta t_1 + \Delta t_2 + ... + \Delta t_n = \frac{1}{F}\left(\frac{Q_1}{k_1} + \frac{Q_2}{k_2} + ... + \frac{Q_n}{k_n}\right),$$

$$\Delta t = \frac{1}{F} \cdot \sum \frac{Q}{k}. \qquad (15.22a)$$

Iš šios lygties apskaičiavę dydį $1/F$ ir gautą vertę įrašę į (15.22) lygtį, gausime:

$$\Delta t_i = \frac{\frac{Q_i}{k_i}}{\sum \frac{Q}{k}} \cdot \Delta t. \qquad (15.23)$$

Norint gauti *mažiausiąjį viso garintuvo paviršiaus plotą,* naudingasis temperatūrų skirtumas kiekviename garintuvo korpuse apskaičiuojamas pagal tokią lygtį:

$$\Delta t_n = \frac{\sqrt{\frac{Q_n}{k_n}}}{\Sigma \sqrt{\frac{Q}{k}}} \cdot \Delta t . \qquad (15.24)$$

Skaičiuojant kelių korpusų garintuvą, paprastai stengiamasi paskirstyti naudingąjį temperatūrų skirtumą taip, kad visų korpusų šilumos mainų paviršiaus plotai būtų vienodi, nes tokie garintuvai būna paprastesni, pigesni ir lengviau eksploatuojami.

Skaičiuojant pagal (15.23) ir (15.24) lygtis patikimi rezultatai gaunami tuo atveju, kai atskirų korpusų šilumos perdavimo koeficientai nelabai priklauso nuo kitų korpusų proceso varos jėgų.

Daugiakorpusio garintuvo schemos ribinis ir optimalus korpusų skaičius. Šilumos sąnaudos mažėja, didėjant garintuvo korpusų skaičiui. Iš čia išeitų, kad tikslinga didinti korpusų skaičių sistemoje. Tačiau praktiškai daugiakorpusio garintuvo sistemoje korpusų būna ne daugiau kaip dešimt (dažniausiai 3...5). Tai aiškinama tuo, kad, didėjant korpusų skaičiui, didėja temperatūros nuostoliai ir mažėja bendra proceso varos jėga – sistemos naudingasis temperatūrų skirtumas ir intensyvumas atskirame aparate.

Laikoma, kad bendras temperatūrų skirtumas ir temperatūros nuostoliai atskiruose korpusuose yra pastovūs ir nepriklauso nuo korpusų skaičiaus. Kadangi bendras naudingasis temperatūrų skirtumas, didėjant korpusų skaičiui, mažėja, tai esant tam pačiam sistemos našumui, reikalingas šilumos mainų paviršius didesnis bus toje sistemoje, kurioje yra daugiau korpusų. Didėjant korpusų skaičiui sistemoje, mažėja atskirų korpusų naudingasis temperatūrų skirtumas. Norint užtikrinti pakankamą virimo intensyvumą, būtina, kad natūralios tirpalo cirkuliacijos garintuvų atskiruose korpusuose naudingasis temperatūrų skirtumas būtų ne mažesnis kaip 5...7 °C. Priešingu atveju virimas bus neintensyvus, maža bus šilumos atidavimo koeficiento α_2 vertė (žr. 12 dalį). Todėl, skaičiuojant tokius garintuvus, būtina, kad naudingasis temperatūrų skirtumas atskirame korpuse būtų didesnis už minimalų leistiną skirtumą $\Delta t_{n,min}$.

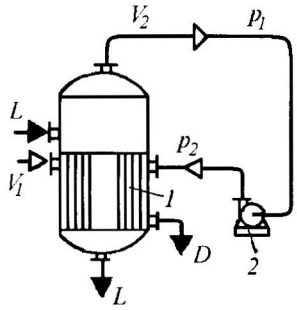
Korpusų skaičiaus riba nustatoma pagal minimalų leistiną naudingąjį temperatūrų skirtumą $\Delta t_{n,min}$, o optimalus korpusų skaičius – remiantis techninių ekonominių tyrimų duomenimis.

15.4. Garintuvai su šiluminiu siurbliu

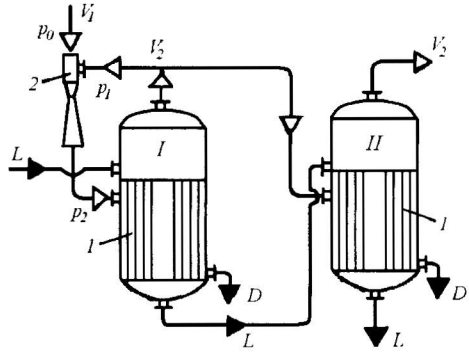
Daugkartinio garinimo schemos turi nemaža trūkumų: gana brangi aparatūra, užimanti daug gamybinio ploto, aukšta virimo temperatūra pirmuosiuose korpusuose. Šių trūkumų neturi vienkorpusis garintuvas su šiluminiu siurbliu. Nagrinėdami garinimo proceso schemas, matėme, kad iš vieno korpuso antriniai garai tiekiami į kitą korpusą jau kaip pirminiai garai, t. y. kaip šildalas. Tiekti antrinių garų į tą patį korpusą negalima, nes šildančiųjų garų temperatūra visada turi būti aukštesnė už antrinių garų temperatūrą (naudingojo temperatūrų skirtumo dydžiu). Tačiau antriniai garai gali būti suslėgti iki tam tikro laipsnio, t. y. gali būti padidinta jų temperatūra, ir tuomet jais galima šildyti tą

patį korpusą, kuriame susidarė. Garai suslegiami kompresoriais (15.10 pav.) arba antrinių garų inžektoriais (15.11 pav.).

Šios garų slėgimo mašinos vadinamos *šiluminiais siurbliais.* Dirbant su šiluminiu siurbliu (15.10 pav.), į garintuvą iš pradžių tiekiami pirminiai garai V, kol užverda šiame aparate esantis tirpalas. Paskui garų tiekimas nutraukiamas. Jie papildomai įleidžiami tik tuomet, kai norima padengti šilumos nuostolius. Susidarę antriniai garai V_2, kurių slėgis p_1, patenka į šiluminį siurblį *2* (turbokompresorių, rotacinį kompresorių). Čia jie suslegiami iki slėgio p_2 ir tiekiami į garintuvo *1* šilumokaitį jau kaip pirminiai garai. Atiduodami jame garavimo šilumą, garai kondensuojasi ir kondensatas išleidžiamas iš šildymo sistemos. Toks uždaras ciklas vyksta tol, kol garintuve *1* gaunamas reikiamos koncentracijos tirpalas. Tuomet gatavas produktas pašalinamas iš aparato ir į jį įleidžiama šviežio tirpalo L; garinimo procesas kartojamas iš naujo.



15.10 pav. Garintuvas su šiluminiu siurbliu: *1* – šilumokaitis, *2* – turbokompresorius



15.11 pav. Garinimas naudojant garų inžektorių: *I, II* – garintuvai; *1* – šilumokaitis, *2* – inžektorius

Šildančiųjų garų sąnaudas D garintuve su šiluminiu siurbliu galima apskaičiuoti pagal garintuvo šilumos balanso lygtį:

$$D \cdot h_s + W \cdot h_{a.g.s} + G_p \cdot h_p = \\ = G_g \cdot h_g + W \cdot h_{a.g.} + (D+W) \cdot h_{s.k} + Q_{konc} + Q_n; \qquad (15.25)$$

čia $h_{a.g.s}$ – suslėgtų antrinių garų entalpija

Kai antriniams garams suslėgti naudojami garų srauto inžektoriai, garinimo procesas gali vykti pagal 15.11 pav. pateiktą schemą. Didelio slėgio p_o garai V_1 (paprastai tiekiami iš katilinės) inžektoriaus *2* tūtoje staiga išsiplečia, įtraukdami į ją ir antrinius garus V_2, kurių slėgis p_1. Iš inžektoriaus ištekėję p_2 slėgio garai ($p_o > p_2 > p_1$) patenka į garintuvo *I* šilumokaitį *1*. Čia jie konden-

suojasi ir kondensatas *D* išleidžiamas iš sistemos. Kadangi dirbant su garų inžektoriais nebūtina sunaudoti visus pirmojo aparato antrinius garus, tai dalis jų gali būti išleidžiami kaip ekstragarai (15.11 pav. neparodyta) arba tiekiama tiesiai į antrąjį garintuvą *II* kaip pirminiai garai. Vadinasi, pastarajame aparate turi būti vakuumas; tada garinamas tirpalas iš aparato *I* į aparatą *II* patenka savitaka. Pagal šią schemą garinimo procesas gali vykti ir nuolatiniu būdu.

Garinimo, naudojant šiluminį siurblį, procesas dėl didelės temperatūrinės depresijos taikomas ribotai. Kuo didesnis šildiklio V_1 ir antrinių garų V_2 temperatūrų skirtumas, tuo didesnį darbą turės atlikti šiluminis siurblys. Kartu, didėjant temperatūrinei depresijai, didėja ir temperatūrų skirtumas. Taigi, šiluminio siurblio atliekamas darbas didėja kartu su temperatūrine depresija, ir galima pasiekti tokią temperatūrinės depresijos vertę, kad praktiškai garinimo aparatas nebegalės normaliai veikti.

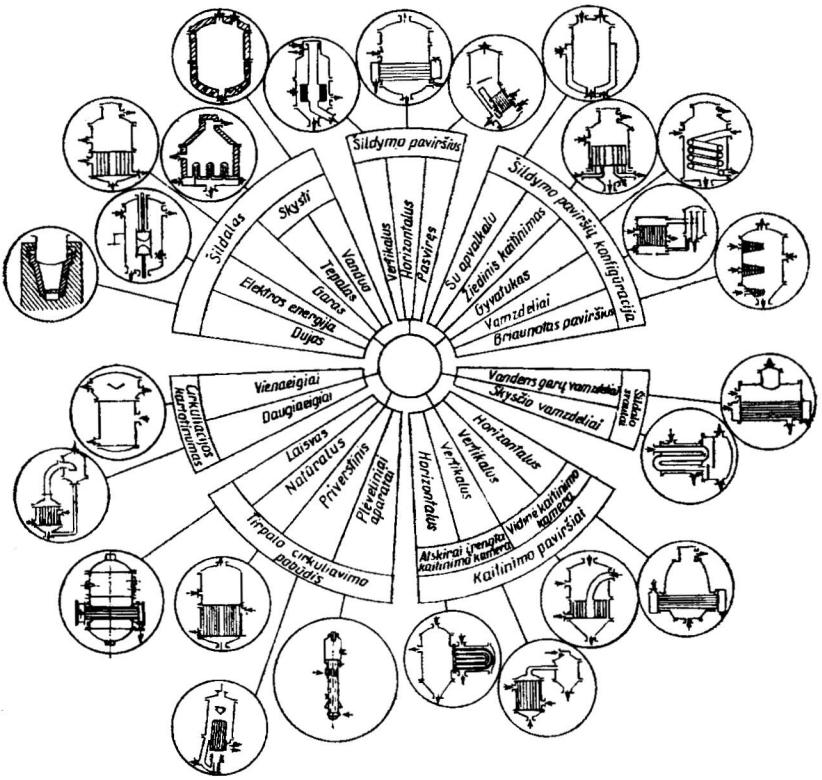
Garintuvą su šiluminiu siurbliu tikslinga naudoti tuomet, kai temperatūrinė depresija ne didesnė kaip 10...12 °C.

15.5. Garintuvų konstrukcija ir eksploatavimas

Galimas garintuvų klasifikavimas pateiktas 15.12 paveiksle. Daugiausia naudojami garais šildomi garintuvai, kuriuose įrengti vamzdiniai šilumokaičiai. Garintuvuose, be įvairių šilumokaičių, būna įrengtas ir garų separatorius, kuriame antriniai garai atskiriami nuo tirpalo.

Garintuvai skirstomi pagal įvairius požymius: šilumokaičių tipą, tirpalo cirkuliavimo aparate pobūdį ir kt. Trumpai panagrinėsime garintuvus, atsižvelgdami į tirpalo cirkuliavimo būdą. Pagal tai garintuvai gali būti: 1) laisvosios cirkuliacijos; 2) natūraliosios cirkuliacijos; 3) priverstinės cirkuliacijos; 4) plėveliniai.

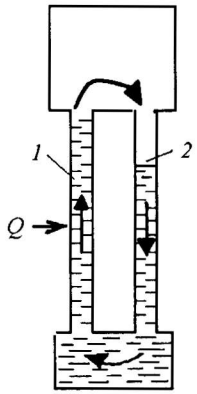
Laisvosios cirkuliacijos garintuvai. Šio tipo aparatuose tirpalas garinamas vamzdinio arba gyvatukinio šilumokaičio (žr. 12.2.2 sk.) tarpvamzdinėje ertmėje, o vamzdžiais teka šildalas. Kartais galima garinti ir apvalkaliniame šilumokaityje, į kurio tarpą tarp sienelių tiekiamas šildiklis. Tokiuose aparatuose susidaro netvarkingos tirpalo konvekcinės srovės ir dėl jų garinamasis tirpalas laisvai cirkuliuoja. Šiuo metu tokie aparatai naudojami tik tada, kai reikia garinti klampius skysčius, nes juose garinimo procesas nėra intensyvus.



15.12 pav. Garintuvų tipai

Natūraliosios cirkuliacijos garintuvai. Jeigu turime dvi ertmes, sujungtas dviem vamzdžiais, į kuriuos iki tam tikro aukščio pripilta tirpalo (15.13 pav.), tai, šildydami vamzdį *1*, kol užvirs jame esantis tirpalas, galime sužadinti natūraliąją tirpalo cirkuliaciją. Kadangi tirpalo, esančio šildomame vamzdyje *1*, tankis bus mažesnis negu tirpalo nešildomame vamzdyje *2*, tai vamzdžiu *1* tirpalas kils aukštyn, o vamzdžiu *2* leisis žemyn, taigi tirpalas natūraliai cirkuliuos. Šiuo būdu sudaromos geros sąlygos šilumos mainams, ir vamzdžiuose nenusėda išviros.

Kad intensyviau cirkuliuotų tirpalas, reikia parinkti tinkamo aukščio cirkuliacijos vamzdį *2* ir žiūrėti, kad tirpalas intensyviai virtų šildomame vamzdyje *1*. Virimo intensyvumas priklauso nuo garinamojo tirpalo fizikinių savybių (klampos, tankio, virimo temperatūros ir kt.) ir garintuvo konstrukcijos.



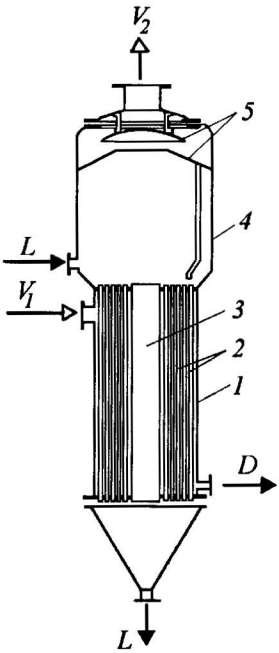
15.13 pav. Skysčio natūraliosios cirkuliacijos schema: *1* – vamzdis, kuriame virinamas tirpalas, *2* – cirkuliacijos vamzdis; *Q* – suteikiama šiluma

Aprašytuoju tirpalo natūraliosios cirkuliacijos principu pagrįstas natūraliosios cirkuliacijos garintuvų veikimas. Natūraliosios cirkuliacijos aparatų yra keli tipai.

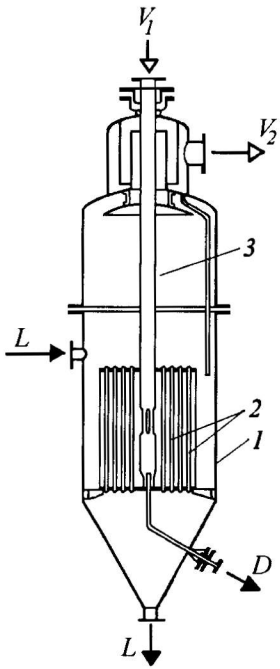
Garintuvai su centriniu cirkuliacijos vamzdžiu (15.14 pav.) yra labai efektyvūs, todėl plačiai naudojami, nors juose skysčio ir garų mišinio judėjimo greitis būna nedidelis – nuo 0,3 iki 0,8 m/s. Tokie aparatai susideda iš šildymo kameros *1* ir separatoriaus *4*. Šildymo kamerą sudaro ilgi vertikalūs vamzdžiai *2*, kuriais cirkuliuoja tirpalas, o tarpvamzdinėje ertmėje kondensuojasi pirminiai garai. Kameros centre įmontuotas didelio skersmens cirkuliacijos vamzdis *3*, kurį garai šildo mažiau negu mažesnio skersmens vamzdžius *2*. Dėl nevienodo centrinio ir šildymo kameros vamzdžių šildymo intensyvumo susidaro palankios sąlygos tirpalui natūraliai cirkuliuoti. Verdantis tirpalas šildymo kameros vamzdžiais *2* kyla aukštyn, o centriniu cirkuliacijos vamzdžiu *3* leidžiasi žemyn. Didelio našumo aparatuose vietoj vieno centrinio cirkuliacijos vamzdžio būna įrengti keli.

Šie aparatai yra paprastos konstrukcijos, juos lengva valyti ir patogu remontuoti. Jie gaminami įvairių dydžių, šildymo paviršius būna 25, 50, 100, 150, 250 ir 350 m^2, šilumokaičio vamzdžių aukštis – nuo 2 iki 4 m, skersmuo – 38...57 mm, cirkuliacijos vamzdžio skersmuo sudaro 1/3 aparato skersmens.

Kitas šio tipo aparatas yra *garintuvas su kabančiaja šildymo kamera* (15.15 pav.). Jame cirkuliacijos vamzdžio funkcijas atlieka žiedinės formos ertmė tarp garintuvo korpuso *1* ir kabančiosios šildymo kameros išorinės sienelės. Šildymo kameros vamzdžiais *2* tirpalas kyla aukštyn, o žiedine ertme leidžiasi žemyn. Tirpalas cirkuliuoja intensyviai, nes garintuvo korpusas *1* nešildomas.



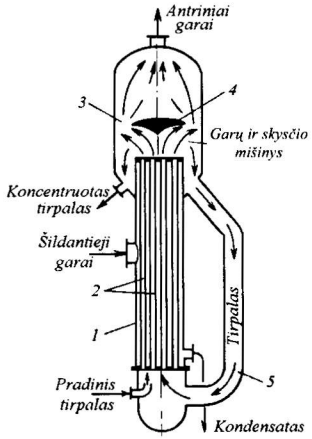
15.14 pav. Vertikalusis garintuvas su vidine šildymo kamera ir centriniu cirkuliacijos vamzdžiu: *1* – šildymo kamera, *2* – vertikalieji vamzdžiai, *3* – centrinis cirkuliacijos vamzdis, *4* – separatorius, *5* – skysčio lašų skirtuvas



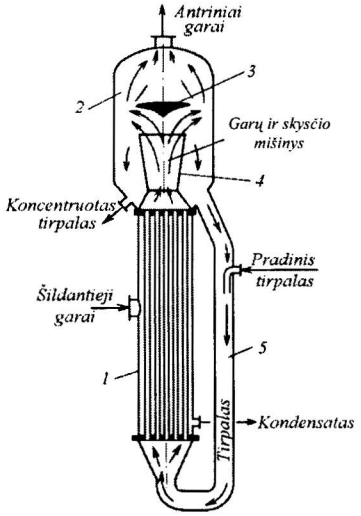
15.15 pav. Garintuvas su kabančiaja šildymo kamera: *1* – garintuvo korpusas, *2* – šildymo kameros vamzdžiai, *3* – pirminių garų tiekimo vamzdis

Šio tipo aparatai taip pat gaminami įvairių matmenų: šildymo kameros paviršius būna 50, 75, 95, 150 m^2, vamzdžių skersmuo apie 64 mm, jų aukštis nuo 1,3 iki 1,7 m. Šie aparatai yra našūs, juos patogu valyti, nes šildymo kamerą galima išimti iš aparato, bet gana sudėtingos konstrukcijos, todėl pramonėje nėra plačiai naudojami.

15.16 pav. pavaizduotas garintuvas su atskirai įrengtu cirkuliacijos vamzdžiu *5*. Šiame aparate cirkuliacijos vamzdis nešildomas ir jame tirpalas neverda, o garų ir skysčio mišinys nesusidaro. Tirpalo, esančio cirkuliacijos vamzdyje *5*, ir tirpalo ir garų mišinio, esančio virimo vamzdeliuose *2*, tankių skirtumas didesnis negu garintuvuose su centriniu cirkuliacijos vamzdžiu, todėl juose tirpalo ir garų mišinio judėjimo greitis ir šilumos perdavimo koeficientas yra didesni. Didėjant tirpalo ir garų mišinio judėjimo virimo vamzdeliuose greičiui, koncentruojantis tirpalams, ant vamzdelių paviršiaus mažiau nusėda druskų.



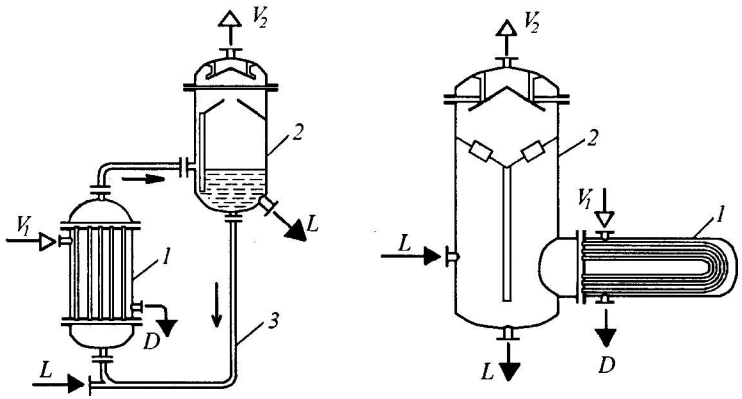
15.16 pav. Garintuvas su bendraaše šildymo kamera ir atskirai įrengtu cirkuliacijos vamzdžiu: *1* – šildymo kamera, *2* – virimo vamzdeliai, *3* – separatorius, *4* – purslų kreipiklis, *5* – cirkuliacijos vamzdis



15.17 pav. Garintuvas su bendraaše šildymo kamera ir atskira virimo zona: *1* – šildymo kamera, *2* – separatorius, *3* – purslų atmušiklis, *4* – virimo vamzdis, *5* – cirkuliacijos vamzdis

Nuosėdų susidaro mažiau naudojant garintuvus su atskira virimo zona (15.17 pav.). Tokiuose aparatuose padidėja skysčio stulpo hidrostatinis slėgis, todėl šildymo kameros vamzdeliuose tirpalas neverda, tik perkaista. Perkaitintasis tirpalas, ištekėdamas iš šildymo kameros vamzdelių į virimo vamzdį *4*, patenka į mažesnio hidrostatinio slėgio zoną ir intensyviai verda. Tada ant šilumos mainų paviršiaus negali susidaryti nuoviros, todėl padidėja šilumos perdavimo koeficientas ir aparatai ilgiau eksploatuojami.

Garintuvai su atskirai įrengta šildymo kamera-virintuvu (15.18 pav.). Šiems garintuvams būdinga tai, kad šildymo kamera *1* ir separatorius *2* yra įrengti atskirai. Tokius aparatus patogu remontuoti, juose susidaro palankios sąlygos tirpalui cirkuliuoti. Verdantis tirpalas šildymo kameros *1* vamzdžiais kyla aukštyn ir patenka į separatorių *2*, o iš jo, iš dalies sukoncentruotas ir šiek tiek ataušęs, cirkuliacijos vamzdžiu *3* grįžta į šildymo kamerą *1* (15.18 pav., *a*). Kai reikia, kad aparatas dirbtų be pertraukos, šildymo kamerų įrengiama ne viena, o dvi (ar net daugiau).



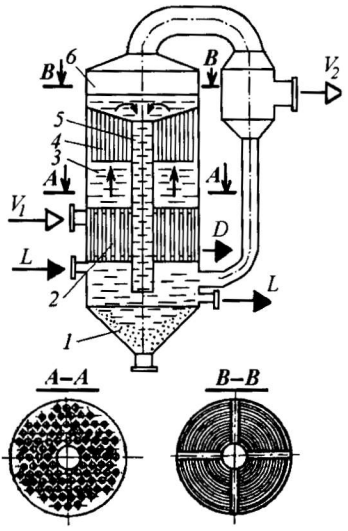
15.18 pav. Garintuvai su atskirai įrengta šildymo kamera-virintuvu: *a* – vertikalusis garintuvas, *b* – horizontalusis virintuvas; *1* – šildymo kamera-virintuvas, *2* – separatorius, *3* – cirkuliacijos vamzdis

Šių aparatų šildymo kameros paviršiaus plotas būna 100, 150, 250, 350, 500, 700 ir 900 m^2, vamzdžių skersmuo – 38...57 mm, jų aukštis – 3...7 m. Tokie aparatai labai našūs, juos lengva eksploatuoti, patogu remontuoti bei valyti, todėl jų naudojama labai daug.

Klampių ir lengvai besikristalizuojančių tirpalų natūrali cirkuliacija garinant paprastai esti neintensyvi. Jiems garinti naudojami garintuvai, kurie nuo aptartųjų skiriasi tik kai kuriais konstrukcijos elementais.

Klampių ir lengvai besikristalizuojančių tirpalų garintuvas pavaizduotas 15.19 pav. Šio aparato konstrukcija panaši į garintuvo su centriniu cirkuliacijos vamzdžiu. Jai būdinga tai, kad virš šildymo kameros *2* ir virinimo kameros *3* yra įrengta žiedinė kamera su pertvaromis *4*, kurios ją suskirsto į žiedinius kanalus (žr. pjūvį *B–B)*. Virš kameros su pertvaromis yra separatorius *6*. Garintuvo centre įtaisytas centrinis cirkuliacijos vamzdis *5*. Žiediniai kanalai skirti stabilizuoti virinimo zonoje verdančio tirpalo srautui, trukdyti jam pulsuoti ir susidaryti nepageidautinoms cirkuliacinėms srovėms.

Tirpalas, šildymo kameros *2* vamzdžiuose pakaitintas iki virimo temperatūros, kyla aukštyn ir, užviręs kameroje *3*, žiediniais kanalais patenka į separatorių *6*. Iš čia iš dalies sukoncentruotas ir kiek ataušęs centriniu cirkuliacijos vamzdžiu 5 jis nuteka žemyn. Susidarantys kristalai sėda kūgio formos dugne *1* (rinktuve) ir periodiškai iš ten yra pašalinami. Šiuose aparatuose tirpalas cirkuliuoja labai greitai (iki 3,5 m/s greičiu; įprastiniuose garintuvuose cirkuliacijos greitis būna 1...1,5 m/s), dėl to pasiekiamas didelis našumas ir vamzdžiuose susidaro daug mažiau išvirų.

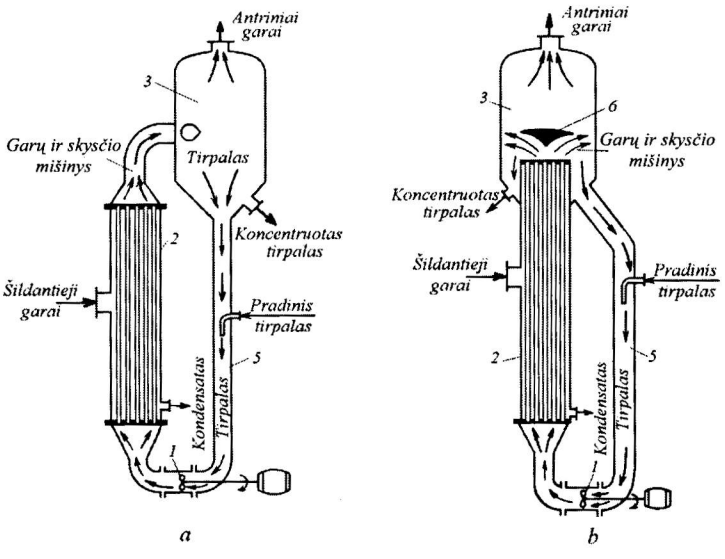


15.19 pav. Garintuvas klampiems ir lengvai besikristalizuojantiems tirpalams garinti: *1* – kristalų rinktuvas, *2* – šildymo kamera, *3* – virinimo kamera, *4* – žiedinės (koncentrinės) pertvaros, *5* – centrinis cirkuliacijos vamzdis, *6* – separatorius

Priverstinės cirkuliacijos garintuvai (15.20 pav.). Garinant labai koncentruotus, klampius ir greitai besikristalizuojančius tirpalus, vien natūralios cirkuliacijos neužtenka.

Tuomet siurbliais *1* tirpalas verčiamas cirkuliuoti priverstinai. Paprastai tirpalas užima ne visą šildymo kamerą *2*. Pirmiausia užverda tirpalas, esantis viršutinėje vamzdžių *2* dalyje, o apatiniai jo sluoksniai šiek tiek perkaista, todėl vamzdžiuose susidaro gana daug skysčio ir garų mišinio ir labai suintensyvėja tirpalo cirkuliacija. Kadangi beveik visą cirkuliacijos sistemą užima skystis, tai daugiausia elektros energijos naudoja siurblys hidrauliniams pasipriešinimams nugalėti.

Šių garintuvų šildymo kameros *2* vamzdžiais tirpalas cirkuliuoja 1,5...3,5 m/s greičiu, todėl šilumos perdavimo koeficientas esti gana didelis (3...4 kartus didesnis, negu esant natūraliai cirkuliacijai). Tokiam garinimo procesui užtenka nedidelio pirminių garų ir verdančio tirpalo temperatūrų skirtumo (3...5 °C). Didžiausias šių aparatų trūkumas yra tai, kad siurbliams reikia papildomos energijos.

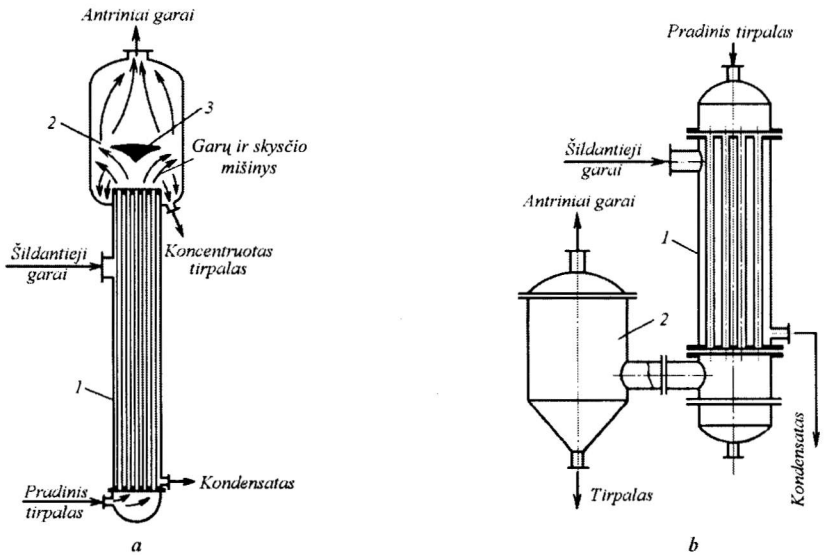


15.20 pav. Priverstinės cirkuliacijos garintuvai su atskirai įrengta šildymo kamera (*a*) bei su atskirai įrengtu cirkuliacijos vamzdžiu (*b*): *1* – siurblys, *2* – šildymo kamera, *3* – separatorius, *5* – cirkuliacijos vamzdis, *6* – purslų atmušiklis

Plėveliniai garintuvai. Putojantys ir aukštoje temperatūroje nepatvarūs skysčiai dažniausiai garinami plėveliniuose garintuvuose (15.21 pav.). Jų šildymo kamera (šildymo paviršiaus plotas 100...900 m^2) susideda iš aukštų (iki 10 m) plonų virintuvo *1* vamzdžių, sujungtų su separatoriumi *2*. Iš išorės vamzdžiai šildomi vandens garais. Tirpalo į juos pripilama iki 1/4...1/5 aukščio. Verdančio tirpalo ir jo garų mišinys virintuvo *1* vamzdžiu kyla į viršų (15.21 pav., *a*) arba leidžiasi žemyn (15.21 pav., *b*). Dėl susidariusių putų prie vamzdžių vidinės sienelės virš skysčio lygio vamzdžių vidinis paviršius tarsi pasidengia plona skysčio plėvele.

Plėveliniai garintuvai priskiriami be tirpalo cirkuliacijos veikiančių aparatų grupei. Garinimo procesas įvyksta skysčiui vieną kartą pratekėjus virimo vamzdžiais.

Proceso metu tirpalas teka į viršų kylančia arba žemyn besileidžiančia plėvele. Aparatuose tirpalas ir susidarę antriniai garai, kurie užima centrinę vamzdžių dalį, dažniausiai juda pasroviui. Dėl to šiuose aparatuose nesusidaro hidrostatinis tirpalo ir garų mišinio stulpas, o kartu ir hidrostatinė depresija. Norimai ribinei tirpalo koncentracijai pasiekti, virintuvas gaminamas iš ilgų vamzdžių (nuo 6 iki 10 m).



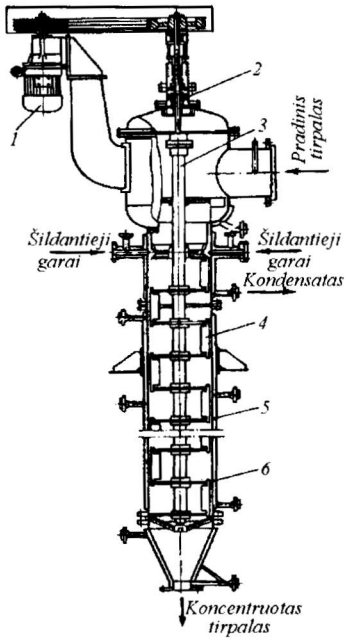
15.21 pav. Plėveliniai garintuvai: *a* – kylančios plėvelės, *b* – žemyn besileidžiančios plėvelės; *1* – šildymo kamera-virintuvas, *2* – separatorius, *3* – purslų atmušiklis

Plėveliniai aparatai pasižymi geromis šilumos mainų savybėmis, todėl jie sunaudoja mažiau šilumos. Tačiau juos eksploatuoti reikia labai atidžiai: visą laiką būtina stebėti, kad nesumažėtų tirpalo lygis vamzdžiuose, nes jeigu ne visas vamzdis bus drėkinamas skysčio, labai sumažės aparato našumas. Be to, šių aparatų našumas labai priklauso nuo slėgio svyravimo, garinamojo tirpalo koncentracijos kitimo ir kt. Juos nepatogu valyti, remontuoti, jie užima daug gamybinio ploto.

Garintuvai su kylančia garinamojo tirpalo plėvele (15.21 pav., *a*) dirba taip. Iš apačios 1/4...1/5 šildymo kameros vamzdžių ilgio užpildoma garinamuoju tirpalu ir tiekiami šildantieji garai, kad tirpalas intensyviai virtų. Veikiami paviršiaus trinties jėgų susidarę antriniai garai kildami su savimi kelia ir garinamąjį tirpalą. Separatoriuje antriniai garai atsiskiria nuo garinamojo tirpalo.

Garintuvuose su žemyn besileidžiančia skysčio plėvele (15.21 pav., *b*) garinamasis tirpalas ir pirminiai garai tiekiami į šildymo kameros *1* viršutinę dalį, kur paprastai būna skysčio skirstytuvas. Vamzdžių vidiniu paviršiumi skystis teka žemyn. Susidarę antriniai garai taip pat teka į apatinę šildymo kameros dalį, iš kur kartu su skysčiu patenka į separatorių *2*, kad atsiskirtų nuo garinamojo tirpalo.

Tirpalo virimo temperatūrai sumažinti plėveliniuose garintuvuose dažnai palaikomas vakuumas.



15.22 pav. Rotacinis plėvelinis garintuvas: *1* – pavara, *2* – sandariklis, *3* – rotorius, *4* – flanšas, *5* – korpusas, *6* – apvalkalas

Bendras vamzdinių garintuvų trūkumas tas, kad juose sunku arba visai negalima garinti agresyvių tirpalų. Tokiems tirpalams garinti dažniausiai naudojami garintuvai, neturintys šilumos mainų paviršiaus, o šildalas (pašildytos arba kūryklų dujos) tiesiogiai liečiasi su garinamuoju tirpalu.

Rotaciniai plėveliniai garintuvai naudojami maisto pramonės tirpalams bei suspensijoms koncentruoti. Šio tipo garintuvą sudaro cilindrinis arba kūginis korpusas, šildomas apvalkaliniu šilumokaičiu (15.22 pav.). Korpuso viduje sukasi rotorius, garinamąjį tirpalą paskirstantis plėvele ant garintuvo vidinio paviršiaus, o kai kuriais atvejais tirpalą paverčiantis lašais arba čiurkšlėmis. Garintuvo aukštis siekia 12,5 m; kai jo skersmuo 1 m, šilumos mainų paviršius būna nuo 0,8 iki 16 m^2.

Šilumos atidavimo koeficientui apskaičiuoti naudojama lygtis

$$\alpha = 110 \cdot (n/\mu)^{0,33} \cdot \lambda ,$$

kur n – rotoriaus sukimosi dažnis; μ – garinamojo tirpalo dinaminė klampa; λ – garinamojo tirpalo šiluminio laidžio koeficientas,

arba kriterijų lygtis

$$Nu = 0,65 \cdot Re^{0,25} \cdot Re_c^{0,43} \cdot Pr^{0,3} \cdot z^{0,33} ;$$

čia $Re_c = d^2 \cdot n/\nu$; z – rotoriaus mentelių skaičius.

Rotaciniai plėveliniai garintuvai būna su standžiaisiais arba su tepančiaisiais rotoriniais maišikliais. Standusis rotorius gaminamas tuščiaviduris su mentelėmis. Tarpelis tarp mentelių ir aparato sienelės gali būti nuo 0,4 iki 1,5 mm. Garinamasis tirpalas tiekiamas į viršutinę aparato dalį ir mentelėmis paskirstomas plėvele ant vidinio korpuso paviršiaus. Mentelių apskritiminis greitis būna apie 12 m/s.

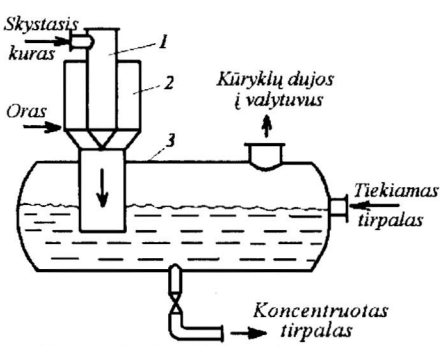
Prie tepančiojo rotorinio maišiklio veleno šarnyriškai pritvirtintos vėliavėlių formos mentelės, kurios rotoriui sukantis išcentrinės jėgos yra prispaudžiamos prie korpuso vidinio paviršiaus ir ant jo plona plėvele užtepa garinamąjį tirpalą. Tokie aparatai naudojami ir tada, kai tirpalas ne tik koncentruo-

jamas, bet kartu ir džiovinamas. Tokių aparatų skersmuo siekia 1 m, šilumos mainų paviršius būna nuo 0,8 iki 12 m^2, rotoriaus su vėliavėlėmis sukimosi apskritiminis greitis – 5 m/s.

Aparatų konstrukcija įgalina stumdant rotorių išilgai ašies reguliuoti plėvelės storį, o kartu ir proceso greitį.

Rotacinių plėvelinių garintuvų šilumos perdavimo koeficientas būna nuo 2300 iki 2700 W/(m^2·K), t. y. didesnis negu plėvelinių garintuvų su žemyn besileidžiančia plėvele, kurių šilumos perdavimo koeficientas tesiekia 1500...1600 W/(m^2·K).

Barbotažiniai garintuvai su panardinamuoju degikliu. Agresyvūs skysčiai: sieros rūgštis, fosforo rūgštis ir kt., efektyviausiai garinami kūryklų dujų barbotavimu per garinamojo tirpalo sluoksnį tam naudojant panardinamuosius degiklius *2* (15.23 pav.), kuriuose deginamas dujinis arba skystasis kuras.



15.23 pav. Barbotažinis garintuvas su panardinamuoju degikliu: *1* – purkštuvas, *2* – panardinamasis degiklis, *3* – garintuvo korpusas

Garinant tirpalus pagal aprašytąją metodiką, sudaromos geros šilumos mainų tarp garinamojo tirpalo ir kūryklų dujų sąlygos, nes kūryklų dujoms barbotuojant burbuliukų pavidalu per garinamąjį tirpalą susidaro skysčio ir dujų mišinys, turintis didelį fazių sąlyčio paviršių.

Tirpalas intensyviai garuoja dujų burbuliukams prisisotinant vandens garų.

Dideliu barbotažinių garintuvų pranašumu laikoma tai, kad juos galima gaminti iš paprasto anglinio plieno, tačiau jų paviršius, besiliečiančius su garinamuoju tirpalu, būtina padengti antikorozinių medžiagų klojiniu. Dažniausiai naudojamos tokios antikorozinės medžiagos: keramika, grafitas, guma, plastikai ir kt.

Garintuvų eksploatavimas. Garinimo procesas gali būti periodinis ir nuolatinis. Kai procesas periodinis, pradinis tirpalas garinamas tol, kol gaunama norima jo koncentracija. Naujas pradinis tirpalas į aparatą vėl pradedamas tiekti tik pašalinus koncentruotą tirpalą – gatavą produktą. Jeigu garinama nuolatiniu būdu, tai visą laiką tiekiamas pradinis tirpalas ir iš sistemos nuolat šalinamas koncentratas. Nuolatinio garinimo būdas už periodinio garinimo būdą pranašesnis tuo, kad nuolatinį procesą galima automatizuoti, vienodesnis

būna temperatūrinis režimas, darbo metu mažiau keičiasi tirpalo koncentracija ir kt. Būtinai reikia stebėti tirpalo lygį garintuvuose ir palaikyti jį vienodą. Garinant periodiniu būdu, pradinis tirpalas į aparatą kartais tiekiamas be pertraukos, kad jame nesikeistų tirpalo lygis. Nuolatiniuose garintuvuose vienodas tirpalo lygis palaikomas reguliuojant koncentrato išleidimą iš sistemos.

Procesas tikrinamas ir reguliuojamas matuojant pirminių ir antrinių garų slėgį (temperatūrą) bei tirpalo temperatūrą. Taip pat reikia žiūrėti, kad tinkamai būtų šalinamas kondensatas (per kondensacijos indus). Nesusikondensavę šildantieji garai išleidžiami pro specialius šildymo kamerų viršuje įrengtus vamzdelius. Užsiteršus šildymo kamerai, garintuvai iš sistemos išjungiami ir išvalomi.

Vakuumo sudarymas garintuvuose. Paskutiniame garinimo sistemos aparate paprastai būna vakuumas. Jis susidaro kondensatoriuose kondensuojantis paskutinio aparato antriniams garams (žr. 13.3.1 sk.). Kondensatoriai sujungiami su vakuuminiu siurbliu, kuriuo nusiurbiamos ne tik nekondensuotos dujos, bet ir iš garų išsiskyręs ir pro nesandarias vietas į sistemą patekęs oras. Paprastai garinimo įrenginių sistemoje palaikomas ne aukštesnis kaip 10...20 kPa absoliutusis slėgis, kas atitinka 45...60 °C kondensacijos temperatūrą.

Skaičiuojant vakuuminius siurblius, be vakuumo, reikia žinoti, kiek susidaro nesikondensuojančių dujų (oro), kurias reikės nusiurbti vakuuminiu siurbliu. Apytiksliai galima tarti, kad garinimo procese dėl aparatūros nesandarumo į sistemą kiekvienam kilogramui antrinių garų patenka apie 10 g oro. Be to, žinotina, kad vienam kilogramui antrinių garų apie 1,5 g oro išsiskiria iš šaldančiojo vandens ir maždaug 10 g oro vienam kilogramui antrinių garų išsiskiria iš besikondensuojančių garų. Taigi vakuuminiu siurbliu reikia nusiurbti maždaug 22 g oro, skaičiuojant vienam kilogramui antrinių garų.

16 DALIS

MASĖS MAINŲ PROCESAI IR APARATAI

Masės mainų procesais vadinami procesai, kurių metu medžiaga pernešama iš vienos fazės į kitą. Šių procesų varos jėga yra cheminių potencialų skirtumas (žr. 2 dalį). Kaip ir kituose procesuose masės mainų varos jėga apibūdina sistemos nukrypimą nuo dinaminės pusiausvyros. Tiriamojoje fazėje medžiaga pernešama iš taško, kuriame jos koncentracija didesnė, į tašką, kuriame koncentracija mažesnė. Todėl inžineriniams skaičiavimams supaprastinti varos jėga dažniausiai išreiškiama koncentracijų skirtumu.

Masės mainų procesai plačiai naudojami perskiriant homogenines skystas bei dujines medžiagas ir jas koncentruojant, taip pat gamtosaugoje (visų pirma valant technologinius nutekamuosius vandenis ir panaudotąsias dujas). Pavyzdžiui, kiekvienoje chemijos gamyboje perdirbamos medžiagos apdorojamos reaktoriuje, kuriame jos tik iš dalies pereina į reakcijos produktus. Iš reaktoriaus ištekantį nesureagavusių pradinių medžiagų ir reakcijos produktų mišinį būtina perskirti, todėl jis tiekiamas į masės mainų aparatus. Iš masės mainų aparatų nesureagavusios pradinės medžiagos grąžinamos į reaktorių, o reakcijos produktai toliau perdirbami arba atiduodami vartoti.

Daugiausia paplito tokie masės mainų procesai:

1. Absorbcija – išskirtinis dujų arba garų (absorbtyvo) sugėrimas visu skysčio (absorbento tūriu). Procesas atitinka medžiagos perėjimą iš dujinės arba garų fazės į skystąją. Dažniausiai naudojama technologinėms dujoms perskirti ir panaudotosioms dujoms valyti.

Absorbcijai atvirkščio desorbcijos proceso metu iš skysčio pašalinamos ištirpusios dujos.

2. Distiliacija ir rektifikacija yra skystų homogeninių mišinių perskyrimas į komponentus arba komponentų grupes, vykstant skysčio ir garų, gautų išgarinant skiriamąjį skystį, sąveikai. Distiliacijos ir rektifikacijos metu komponentai iš skystosios fazės pereina į garų fazę, o po to susikondensavus garams vėl virsta skystąja faze. Procesas naudojamas skystiems mišiniams perskirti į juos sudarančius komponentus, labai gryniems skystiems komponentams gauti ir kitiems tikslams.

3. Ekstrakcija dviejų skysčių sistemose – tai viename tirpiklyje ištirpusio skysto komponento – ekstraktyvo išgavimas kitu tirpikliu – ekstrahentu, kuris su pirmuoju tirpikliu nesimaišo arba tik iš dalies maišosi. Šio proceso metu ekstraktyvas iš vienos skystosios fazės pereina į kitą. Procesas naudojamas ištirpusioms medžiagoms arba jų grupėms išgauti, kai jų koncentracijos nedidelės.

4. Adsorbcija – tai išskirtinis procesas, kai dujas, garus arba skystyje ištirpusias medžiagas (adsorbtyvą) sugeria kieta medžiaga – adsorbentas, sugebantis iš perskiriamojo mišinio sugerti vieną komponentą arba komponentų grupę. Procesas remiasi komponento arba komponentų grupės perėjimu iš skystosios, dujinės arba garų fazės į kietąją fazę. Adsorbcijos metu iš mišinio išgaunamas vertingas produktas arba produktų grupė, kai jų koncentracija gana maža. Priešingas adsorbcijai procesas, t. y. adsorbuoto komponento arba komponentų grupės išgavimas iš kieto sorbtyvo, vadinamas desorbcija.

5. Jonų mainai – išskirtinis jonų išgavimas iš elektrolitų tirpalų. Proceso metu išgaunama medžiaga iš skystosios fazės pereina į kietąją fazę grąžindama į skystąją fazę ekvivalentinį kitų vienvardžių jonų kiekį. Procesas naudojamas medžiagų jonams išgauti iš tirpalo, esant nedidelei jų koncentracijai.

6. Džiovinimas – drėgmės pašalinimas iš drėgnos kietos medžiagos, daugiausia ją išgarinant. Šio proceso metu drėgmė iš kietos drėgnos medžiagos pereina į dujinę arba garų fazę. Džiovinant dažniausiai iš perdirbamosios medžiagos šalinama drėgmė arba iš gautų produktų šalinamas vanduo.

7. Tirpimas ir ekstrakcija iš kietų medžiagų – tai medžiagos perėjimas iš kietosios fazės į skystąją – tirpiklį. Konkrečios medžiagos arba medžiagų išgavimas tirpinimo būdu iš poringos kietos medžiagos vadinamas ekstrahavimu iš kietų medžiagų arba išplovimu. Ekstrahuojama, kai iš kietų medžiagų reikia išgauti vertingus arba toksiškus komponentus.

8. Kristalizacija – kietos medžiagos išgavimas kristalų forma iš tirpalų arba lydinių. Tai medžiagos perėjimas iš skystosios fazės į kietąją. Dažniausiai naudojama labai švarioms medžiagoms gauti.

9. Membraniniai procesai – išskirtinis komponentų išgavimas arba jų koncentravimas naudojant puslaides membranas. Tai medžiagos arba medžiagų perėjimas iš vienos fazės į kitą per jas skiriančią membraną. Naudojami perskiriant dujų arba skysčių mišinius, valant nutekamuosius vandenis arba išmetamąsias dujas.

Visiems šiems procesams bendra yra tai, kad medžiaga arba medžiagų grupė pereina iš vienos fazės į kitą. Medžiagos arba medžiagų grupės perėjimas iš fazės į fazę pusiausvyros pasiekimo kryptimi vadinamas masės mainais. Skirtingai nuo šilumos mainų, kurie vyksta per sienelę, masės mainai vyksta tiesiogiai liečiantis fazėms, išskyrus membraninius procesus. Šiuo atveju lietimosi riba, t. y. fazių sąlyčio paviršius, gali būti paslankus (sistemose

dujos–skystis, *garai–skystis*, *skystis–skystis*) arba nepaslankus (sistemose *dujos–kietasis kūnas*, *garai–kietasis kūnas*, *skystis–kietasis kūnas*).

Medžiagos pernaša fazės viduje – iš fazės į fazes skiriantį paviršių arba atvirkščiai – iš fazes skiriančio paviršiaus į fazės vidų – vadinama masės atidavimu – pagal analogiją su šilumos pernešimu fazės viduje – šilumos atidavimu.

Masės mainų procesai paprastai būna grįžtamieji. Proceso kryptis priklauso nuo medžiagos koncentracijų fazėse ir pusiausvyros sąlygų.

Izoliuotoje uždaroje sistemoje, susidedančioje iš dviejų arba daugiau fazių, medžiagos perėjimas iš vienos fazės į kitą prasideda savaime ir vyksta iki to laiko, kol tarp fazių, esant konkrečiai temperatūrai ir slėgiui, nusistovi paslankioji arba dinaminė pusiausvyra. Pusiausvyros sąlygomis iš pirmosios fazės į antrąją per laiko vienetą pereis tiek molekulių medžiagos, kiek iš antrosios į pirmąją. Jeigu, nusistovėjus pusiausvyrai, padidinsime paskirstomosios medžiagos kiekį, pvz., dujinėje fazėje V padidinsime n molekulių, tai paskirstomoji medžiaga iš dujinės fazės V pereis į skystąją fazę L. Perėjimo greitis bus nusakomas ne bendru dujinėje fazėje esančių paskirstomosios medžiagos molekulių skaičiumi $m + n$, o tik pertekliniu molekulių skaičiumi pusiausviro skaičiaus m atžvilgiu. Kadangi koncentracija proporcinga molekulių skaičiui, tai paskirstomosios medžiagos perėjimo iš vienos fazės į kitą greitis proporcingas faktinės arba darbinės paskirstomosios medžiagos koncentracijos tiriamojoje fazėje $m + n$ ir pusiausviros paskirstomosios medžiagos koncentracijos tiriamojoje fazėje m skirtumui. Tai reiškia, kad kuo didesnis šis skirtumas, tuo daugiau medžiagos M, kai kitos sąlygos tos pačios, pereis iš vienos fazės į kitą. Jeigu šis skirtumas neigiamas, tai medžiaga M pereina iš skystosios fazės L į dujinę fazę V, t. y. procesas vyksta priešinga kryptimi.

Taigi paskirstomosios medžiagos pusiausviros koncentracijos vertės leidžia nustatyti proceso kryptį, iš kurios fazės į kurią pereis medžiaga M, ir proceso greitį.

Kaip anksčiau buvo minėta, masės mainų procesai vyksta tik pažeidus fazių pusiausvyrą. Šiomis sąlygomis paskirstomoji medžiaga pereina iš vienos fazės į kitą. Skiriami du medžiagos pernašos būdai: molekulinis ir konvekcinis.

Nejudančioje aplinkoje paskirstomoji medžiaga pereina iš vidinių tiriamos pirmosios fazės sluoksnių į fazes skiriantį paviršių ir, jį perėjusi, pasiskirsto visame kitos, kontaktuojančios su pirmąja, fazės tūryje. Toks medžiagos masės perėjimas iš vienos fazės į kitą vadinamas molekuline difuzija. Ji yra šiluminio molekulių, jonų, atomų judėjimo, kuriam pasipriešinimą sudaro vidinė trintis, pasekmė.

Konvekcinė pernaša, arba konvekcinė difuzija, apibūdinama medžiagos judėjimu arba pernešimu judančiomis srauto dalelėmis, vykstant turbulentiniam fazių judėjimui. Konvekcinė medžiagos pernaša, veikiant turbulentinei pulsacijai, kai kada vadinama turbulentine difuzija.

Pagrindinė masės perdavimo procesų kinetinė lygtis yra masės perdavimo lygtis, išvesta remiantis kinetiniais cheminės technologijos procesų dėsningumais.

Proceso greitis, kg/(m^2 s), lygus varos jėgai Δ, padalytai iš pasipriešinimo:

$$dM/dF = \Delta/R;$$

čia dM – medžiagos kiekis, perėjęs per laiko vienetą iš vienos fazės į kitą, kg/(m^2·s); dF – fazių sąlyčio paviršiaus plotas, m^2.

Pažymėję $1/R = K$, gausime:

$$dM = K \cdot \Delta \cdot dF.$$

Ši išraiška vadinama pagrindine masės pernašos lygtimi, kur dydis K apibūdina medžiagos pernašos iš vienos fazės į kitą fazę proceso greitį. Pagal analogiją su šilumos pernašos procesu K vadinamas masės perdavimo koeficientu. Pasinaudodami masės pernašos lygtimi, nusakysime masės perdavimo koeficiento fizikinę prasmę:

$$[K] = \left[\frac{dM}{\Delta \cdot dF}\right] = \left[\frac{kg}{s \cdot m^2 \cdot \Delta}\right],$$

t. y. masės perdavimo koeficientas K parodo, kiek paskirstomosios medžiagos per laiko vienetą pereina iš fazės į fazę, per fazių sąlyčio paviršiaus ploto vienetą, kai proceso varos jėga lygi vienetui. Proceso varos jėgos matavimo vienetas gali būti įvairus, o nuo jo priklauso ir masės perdavimo koeficiento K matavimo vienetas.

Dažniausiai masės pernašos lygtis naudojama apskaičiuoti fazių sąlyčio paviršiaus plotui F, o pagal jį nustatomi ir masės mainų aparatų matmenys. Integralinė masės perdavimo lygtis, išspręsta fazių sąlyčio paviršiaus ploto F atžvilgiu, užrašoma taip:

$$F = M/(K \cdot \Delta).$$

Dydis K yra daugelio kintamųjų funkcija ir jam nustatyti bendros lygties nėra.

Analizuojant masės mainų procesus, pirmiausia bus kreipiamas dėmesys į fazių sąlyčio paviršiaus ribų būklę, nuo kurios priklauso masės pernašos mechanizmas. Pagal šį principą masės mainų procesai skirstomi į masės perdavimą sistemose su paslankiomis fazių sąlyčio paviršiaus ribomis (*dujos–skystis*, *garai–skystis*, *skystis–skystis*), masės perdavimą sistemose su nejudamu (nesikeičiančiu) fazių sąlyčio paviršiumi (sistemos *dujos–kietasis kūnas*, *garai–kietasis kūnas*, *skystis–kietasis kūnas*) ir masės perdavimą per puslaides membranas.

16.1. Masės perdavimo procesai sistemose su paslankiomis fazes skiriančių paviršių ribomis

Procesams, kuriems būdingos paslankios fazes skiriančio paviršiaus ribos, priskiriami tokie plačiai paplitę technologiniai procesai: absorbcija, desorbcija, distiliacija ir rektifikacija, ekstrakcija iš skysčių. Šiuose procesuose fazių sąlyčio paviršius yra paslankus ir priklauso nuo proceso hidrodinaminio režimo, kas iš esmės skiria masės pernašos mechanizmą sistemose su paslankiomis fazes skiriančių paviršių ribomis nuo pernašos mechanizmo sistemose su kietąja faze.

Masės mainų procesai, esant paslankioms fazes skiriančio paviršiaus riboms, pagal fazių dalyvavimo pernešant masę principą skiriami į dvi grupes. Vienai grupei priskiriami procesai (absorbcija, desorbcija, ekstrakcija), kuriuose dalyvauja ne mažiau kaip trys medžiagos. Juose pirmoji paskirstančioji medžiaga (arba medžiagos) sudaro vieną, pvz., *V*, fazę (pvz., sugeriant vandeniui amoniaką iš oro amoniako mišinių, oras tiesiogiai masės mainų procesuose nedalyvauja); antroji paskirstančioji medžiaga (arba medžiagos) sudaro antrąją, pvz., *L*, fazę (minėtame pavyzdyje – vanduo); trečioji – paskirstomoji medžiaga *M*, kuri pereina iš vienos fazės į kitą (minėtame pavyzdyje – amoniakas).

Kita procesų grupė – tai procesai (distiliacija ir rektifikacija), kai fazes sudarančios medžiagos dalyvauja masės mainuose ir negali būti nagrinėjamos kaip paskirstomosios medžiagos nešikliai.

Kaip buvo minėta anksčiau, proceso kryptis ir varos jėga priklauso nuo darbinių ir pusiausvirųjų koncentracijų. Darbo ir pusiausvyros linijų sudarymas buvo nagrinėjamas šio vadovėlio 2 ir 3 dalyse. Kitose dalyse, skirtose vienam ar kitam konkrečiam masės pernašos procesui (absorbcijai, distiliacijai ir kt.), bus nagrinėjama sistemos pusiausvyra ir šių procesų medžiagų balansai, kuriuos naudojant bus gaunamos darbo linijos.

Kadangi masės mainuose dalyvaujančių fazių koncentracijos gali būti matuojamos įvairiais vienetais (kg/kg, kmol/m^3 ir t. t.), tai tikslinga panagrinėti šių fazių sudėties reiškimo būdus. Paprastai fazių sudėtys reiškiamos masės arba molio dalimis, santykinėmis arba tūrio vienete.

Koncentracijų reiškimas masės arba molio dalimis. Fazės sudėtis išreiškiama konkretaus komponento ir visos fazės masių santykiu. Pvz., iš komponentų *A* ir *B* sudarytos sistemos molinė mišinio sudėtis pagal komponentą *A* (x_A), išreiškiama lygtimi

$$x_A = \frac{\bar{x}_A / M_A}{\left(\bar{x}_A / M_A\right) + \left(1 - \bar{x}_A\right) / M_B}, \qquad (16.1)$$

o mišinio masės sudėtis pagal komponentą A ($\bar{x}_A$) – lygtimi

$$\bar{x}_A = M_A \cdot x_A / [M_A \cdot x_A + M_B \cdot (1 - x_A)]; \qquad (16.2)$$

čia M_A ir M_B – komponentų A ir B molių masės.

Daugiakomponenčių mišinių i-ojo komponento

$$x_i = \left(\bar{x}_i / M_i\right) \Big/ \sum_{i=1}^{n} \left(\bar{x}_i / M_i\right); \qquad (16.2a)$$

čia n – mišinio komponentų skaičius.

Santykinės koncentracijos reiškimas masės ir molio dalimis. Jeigu $\bar{X}$ ir $\bar{Y}$ išreikšime paskirstomojo komponento santykines masės koncentracijas fazėse L ir V, $kg/kg_{nešiklio}$, tai, žinodami šio komponento koncentracijas $\bar{x}$ ir $\bar{y}$, masės dalimis, $\bar{X}$ ir $\bar{Y}$ galėsime apskaičiuoti pagal tokias lygtis:

$$\bar{X} = \bar{x} / (1 - \bar{x}), \qquad \bar{Y} = \bar{y} / (1 - \bar{y}), \qquad (16.3)$$

o $\bar{x}$ ir $\bar{y}$ vertės, kai žinomos $\bar{X}$ ir $\bar{Y}$ vertės, – pagal lygtis

$$\bar{x} = \bar{X} / (1 - \bar{X}), \qquad \bar{y} = \bar{Y} / (1 - \bar{Y}). \qquad (16.3a)$$

Daugiakomponenčių mišinių masės koncentracijos $\bar{x}$ ir $\bar{y}$ apskaičiuojamos pagal tokias lygtis:

$$\bar{x} = \bar{X} \Big/ \left(1 + \sum_{i=1}^{n} \bar{X}\right), \qquad \bar{y} = \bar{Y} \Big/ \left(1 + \sum_{i=1}^{n} \bar{Y}\right). \qquad (16.4)$$

Fazių sudėtis išreikšti santykinėmis masės arba molio koncentracijomis patogu dėl to, kad apskaičiuojamas paskirstomojo komponento kiekis, tenkantis nešiklio kiekio, kuris proceso metu nesikeičia, vienetui. Esant mažoms paskirstomojo komponento koncentracijoms, santykinės molinės koncentracijos ir molio dalys vienos su kitomis beveik sutampa.

Jeigu paskirstomosios medžiagos koncentracijos pateiktos molio dalimis, tai jų santykinės masinės koncentracijos apskaičiuojamos pagal tokias lygtis:

$$\bar{X} = M_x / [M_n \cdot (1 - x)], \qquad \bar{Y} = M_y / [M_n \cdot (1 - y)]; \qquad (16.5)$$

čia M_n – paskirstomojo komponento molio masė.

Koncentracijos tūrio vienete. Priklausomybė tarp fazių tūrio sudėties (c_A, c_B, ...), kg/m^3, išreiškiama šių komponentų masės dalimis mišinyje:

$$x_i = c_i / \rho; \qquad (16.6)$$

čia ρ – mišinio tankis (t. y. visų mišinio komponentų masių, kg, esančių 1 m^3 mišinio, suma).

16.2. Masės mainų proceso medžiagų balansas

Medžiagų balanso pagrindai buvo nagrinėjami vadovėlio pirmoje dalyje, o konkretaus masės mainų proceso medžiagų balansas bus aptariamas, nagrinėjant konkrečius masės mainų procesus. Šioje dalyje aptarsime masės mainų procesų medžiagų balansų sudarymą, atsižvelgdami į jų specifiką.

Masės mainų procesų balansai priklauso nuo jų atlikimo būdo. Skiriama vienkartinė, nepertraukiamoji ir pakopinė, arba laipsninė, fazių sąveika.

Vienkartinė fazių sąveika būdinga periodiniams procesams, kai jų našumas mažas. Jų metu fazės sumaišomos, o procesui pasibaigus perskiriamos (pvz., periodinis ekstrakcijos iš skysčių procesas aparate su maišykle).

Tokio proceso bendro medžiagų kiekio ir *i*-ojo komponento kiekio balansas užrašomas taip:

$$V_p + L_p = V_g + L_g; \qquad (16.7)$$

$$V_p \cdot y_{i.p} + L_p \cdot x_{i.p} = V_g \cdot y_{i.g} + L_g \cdot x_{i.g}; \qquad (16.8)$$

čia V_p ir V_g – dujų arba ekstrahento (skysčio) debitas, srautui įtekant į aparatą ir iš jo ištekant; L_p ir L_g – skysčio arba pradinio tirpalo debitas, srautui įtekant ir ištekant; $y_{i.p}$, $x_{i.p}$, $y_{i.g}$, $x_{i.g}$ – *i*-ojo komponento koncentracija V ir L fazėse, jų srautams įtekant ir ištekant.

Jeigu V ir L, kintant fazių sudėčiai, mažai kinta, t. y. $V_p \approx V_g$ ir $L_p \approx L_g$, tuomet iš (16.8) lygties gauname:

$$y_{i.g} = y_{i.p} + (L/V) \cdot (x_{i.p} - x_{i.g}). \qquad (16.9)$$

(16.9) lygtis parodo perskiriamųjų produktų sudėčių priklausomybę nuo fazių debitų santykio L/V ir yra darbo linijos lygtis.

Nuolatiniuose masės mainų aparatuose procesas gali vykti esant nepertraukiamam fazių kontaktui (pvz., plėveliniuose absorberiuose, kurie pagal konstrukciją yra vamzdiniai korpusiniai šilumokaičiai). Vamzdžių vidiniu paviršiumi teka skysčio plėvelė, o šiam skysčiui priešpriešiais teka dujos. Tokio proceso metu paskirstomosios medžiagos koncentracija fazėse kinta nepertraukiamai.

Pakopinių masės mainų aparatų (pvz., vertikaliųjų aparatų su horizontaliomis pertvaromis – lėkštėmis) kiekvienoje pakopoje fazės sąveikauja (žr. 17.5.3 sk.), o iš kiekvienos pakopos ištekančios fazės yra perskiriamos. Proceso vyksmas, esant nepertraukiamai arba pakopinei fazių sąveikai, priklauso nuo fazių judėjimo tarpusavio krypčių (pasrovinis, priešsrovinis ir kt.) ir hidrodinaminės jų srautų struktūros.

Technologiniuose procesuose dažnai panaudojamas nepertraukiamas priešsrovinis fazių judėjimas (16.1 pav., *a*). Sudarant tokio proceso medžiagų

balansą, laisvai pasirenkamas aparato skerspjūvis. Srautų nueitam keliui nedaug pakitus, medžiagų kiekiai pakinta tokiais dydžiais:

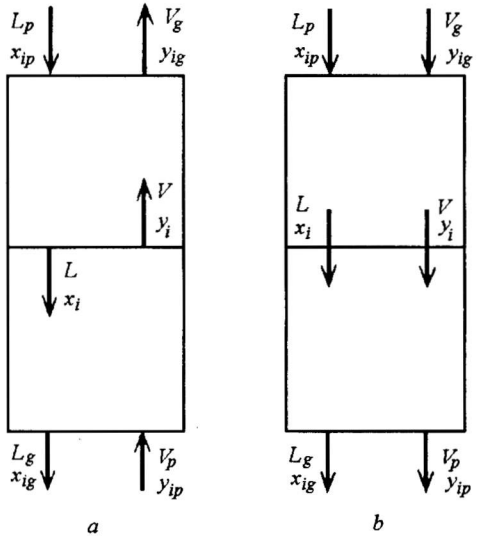
- bendras kiekis – $dV = dL$;
- i-ojo komponento kiekis – $d(V \cdot y_i) = d(L \cdot x_i)$.

Suintegravę nuo lygtyse esančių dydžių pradinių verčių iki jų verčių laisvai pasirinktame skerspjūvyje, gauname tokias lygtis:

$$V_p - L_g = V_g - L_p = V - L$$

ir

$$V_p \cdot y_{i.p} - L_g \cdot x_{i.g} = V_g \cdot y_{i.g} - L_p \cdot x_{i.p} = V \cdot y_i - L \cdot x_i . \qquad (16.10)$$



16.1 pav. Fazių srautų schemos: *a* – priešsrovinio, *b* – pasrovinio

Kai V ir L vertės aparato aukštyje kinta nedaug:

$$y_i = y_{i.p} + (L/V) \cdot (x_i - x_{i.g}) = y_{i.g} + (L/V) \cdot (x_i - x_{i.p}) . \qquad (16.11)$$

(16.11) lygtis vadinama nuolatinio priešsrovinio masės mainų proceso darbo linijos lygtimi. Ji išreiškia priklausomybę tarp sąveikaujančių fazių sudėčių laisvai pasirinktame aparato skerspjūvyje. Kai $L/V = const$, darbo linija yra tiesė, o kai $L/V \neq const$, ji nukrypsta nuo tiesės.

16.1 paveiksle, *b*, pavaizduotas fazių judėjimas iš viršaus žemyn, nors iš principo pasrovinis fazių judėjimas gali vykti ir priešinga kryptimi – iš apačios į viršų. Jo metu tarp fazių vyksta masės mainai. Kaip ir priešsrovinio judėjimo atveju, medžiagų balanso lygtis, kai aparatas yra be galo mažo aukščio, turi tokią išraišką:

- bendro srauto – $dV = -dL$,
- *i*-ojo komponento – $d(V \cdot y_i) = -d(L \cdot x_i)$.

Suintegravę šias lygtis nuo kintamųjų pradinių verčių, kurias jie įgauna srautui įtekant į aparatą, iki galinių verčių, t. y. tų, kurias jie įgauna fazių srautams ištekant iš aparato, gauname bendro fazių kiekio ir pagal *i*-ojo komponento medžiagų balanso lygtis:

$$V_g - V_p = L_p - L_g, \qquad V_g \cdot y_{i\cdot g} - V_p \cdot y_{i.p} = L_p \cdot x_{i.p} - L_g \cdot x_{i.g};$$

iš čia $V_p + L_p = V_g + L_g, \qquad V_p \cdot y_{i.p} + L_p \cdot x_{i.p} = V_g \cdot y_{i.g} + L_g \cdot x_{i.g}$.

Bendresnei lygčiai, aprašančiai sąveikaujančių fazių sudėties kitimą pagal masės mainų aparato aukštį, gauti pradines lygtis suintegruojame nuo pradinių (arba galinių) šiose lygtyse esančių dydžių verčių iki jų verčių laisvai pasirinktame aparato skerspjūvyje (16.1 pav., *b*). Tada gausime:

$$V_p + L_p = V + L = const,$$

$$V_p \cdot y_{i.p} + L_p \cdot x_{i.p} = V \cdot y_i + L \cdot x_i = const. \qquad (16.12)$$

(16.12) lygtis parodo, kad masės mainų aparato aukštyje vyksta tik *i*-ojo komponento persiskirstymas tarp fazių. Bendras medžiagos ir bet kokio *i*-ojo komponento kiekis aparato aukštyje nesikeičia. Fazių debitams *V* ir *L* šiek tiek kintant pagal aparato aukštį, (16.12) lygtis pertvarkoma į tokią lygtį:

$$y_i = y_{i.p} - (L/V) \cdot (x_i - x_{i.p}). \qquad (16.13)$$

Taip gaunama nuolatinio pasrovinio masės mainų proceso darbo linijos lygtis. Šią lygtį palyginus su (16.11) lygtimi matyti, kad jos yra tokios pat struktūros, skiriasi tik ženklu prieš dydį $-(L/V) \cdot (x_i - x_{i.p})$.

Reikia pabrėžti, kad (16.11) ir (16.13) lygtys išvestos tam atvejui, kai masės mainų aparate išilginis maišymasis nevyksta, t. y. idealaus išstūmimo modeliui.

16.3. Molekulinė difuzija

Vadovėlio 3-ioje dalyje minėjome, kad sraute vyksta masės pernaša dviem būdais: molekuliniu ir konvekciniu.

Molekulinė difuzija aprašoma pirmuoju Fiko dėsniu:

$$d^2M = -D \cdot dF \cdot d\tau \cdot \partial c/\partial n . \qquad (16.14)$$

Visam difuzijos paviršiaus plotui F pirmasis Fiko dėsnis užrašomas taip:

$$M = -D \cdot F \cdot \tau \cdot \partial c/\partial n ; \qquad (16.14a)$$

čia D – molekulinės difuzijos koeficientas; F – difuzijos krypčiai statmenas arba normalinis paviršiaus plotas; $\partial c/\partial n$ – medžiagos koncentracijos gradientas, skaičiuojamas difunduojančiosios medžiagos nueito kelio ilgio n vienetui; minuso ženklas rodo, kad difuzija vyksta koncentracijos gradiento $\partial c/\partial n$ mažėjimo kryptimi.

Molekulinės difuzijos koeficientas D priklauso nuo difunduojančiosios medžiagos prigimties. Todėl jis nesusijęs su proceso dinamika ir apibūdina medžiagos gebą prasiskverbti į kokią nors terpę. Naudojantis (16.14a) lygtimi, išvedamas difuzijos koeficiento matavimo vienetas:

$$[D] = \left[\frac{M \cdot \partial n}{F \cdot \tau \cdot \partial c}\right] = \left[\frac{kg \cdot m \cdot m^3}{m^2 \cdot s \cdot kg}\right] = \left[\frac{m^2}{s}\right].$$

Iš čia išplaukia, kad *molekulinės difuzijos koeficientas D rodo, kiek medžiagos difunduoja per laiko vienetą pro ploto vienetą, kai koncentracijos gradientas lygus vienetui.* Molekulinės difuzijos koeficientas D yra temperatūrinio laidžio koeficiento a analogas.

Koeficiento D vertė parenkama žinyne arba apskaičiuojama, pvz.:

- dujoms:

$$D_d = \frac{0{,}0435 \cdot T^{3/2}}{P \cdot \left(V_A^{1/2} + V_B^{1/2}\right)^2} \cdot \sqrt{\frac{1}{M_A} + \frac{1}{M_B}}, \qquad (16.15)$$

- skysčiams:

$$D_{sk} = \frac{8{,}2 \cdot 10^{-6}}{\mu \cdot V_A^{1/3}} \cdot \left[1 + \left(\frac{3 \cdot V_B}{V_A}\right)^{2/3}\right]; \qquad (16.16)$$

čia T – absoliučioji temperatūra, K; P – slėgis, Pa; V_A ir V_B – sąveikaujančių medžiagų molių tūriai, cm^3/mol; M_A ir M_B – molių masės, kg/kmol; μ – terpės, kurioje vyksta difuzija, dinaminė klampa, Pa·s.

Taigi difuzijos koeficientas priklauso nuo temperatūros: jai didėjant, difuzijos koeficientas didėja. Dujų difuzijos koeficientas priklauso ir nuo slėgio: jam didėjant, – mažėja.

Eksperimentais nustatyta, kad dujų terpėje $D_d \approx 1$ cm^2/s, o kondensato (skysčio) terpėje $D_{sk} \approx 1$ cm^2/parą. Iš čia galima daryti išvadą, kad molekulinė difuzija skysčiuose, o tuo labiau kietuosiuose kūnuose, vyksta labai lėtai.

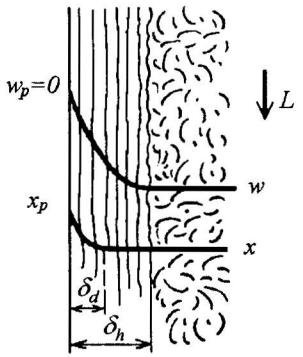
Griežtai vertinant, molekulinės difuzijos proceso varos jėga yra medžiagos cheminio potencialo gradientas. Cheminiu potencialu laikomos medžiagos būdingųjų funkcijų dalinės išvestinės pagal komponentų molių skaičių N_i, kai visi kiti būklės parametrai yra pastovūs, pvz., $\partial h/\partial N_i = \mu_i = \partial U/\partial N_i = \partial G/\partial N_i$; čia h – entalpija; U – vidinė energija; G – Gibso energija. Tačiau pernešant vieną komponentą, $\mu_i = f(c_i)$; čia c_i – i-ojo komponento koncentracija mišinyje. Tada kaip varančiąja proceso jėgą galima naudoti koncentracijos gradientą, kas gerokai suprastina skaičiavimą. Esant nedidelėms komponentų koncentracijoms, realiose sistemose kaip varančiąją jėgą taip pat galima naudoti koncentracijos gradientą. Jei realios sistemos yra pakankamai koncentruotos, kaip varos jėgą naudojant koncentracijos gradientą, reikia nustatyti sistemos (skiriamojo mišinio) būklės įtaką molekulinės difuzijos koeficiento vertei.

16.4. Konvekcija ir masės atidavimas

Konvekcine masės pernaša suprantama medžiagos pernaša judant skysčiui arba dujoms. Šis procesas vyksta judant skysčio arba dujų srautui makrotūriais.

Panagrinėsime kai kuriuos masės pernašos fazės viduje, t. y. nuo branduolio link fazes skiriančio paviršiaus arba atvirkščiai – nuo fazių sąlyčio paviršiaus į srauto branduolį, procesus. Tariame, kad nagrinėjamu atveju vyksta masės pernaša tarp dujų ir skysčio (absorbcijos procesas, t. y. masės pernaša vyksta iš fazės V į fazę L) ir srautų judėjimas yra turbulentinis.

Turbulentinio srauto kanale hidrodinaminiai savitumai buvo nagrinėjami vadovėlio 3-ioje dalyje. Čia reikia pažymėti hidrodinaminių sąlygų įtaką medžiagos pernašai. Pasienio sluoksnyje, kurio storis δ_h (16.2 pav.), koncentracija staigiai keičiasi; kadangi šioje srauto srityje proceso greitis nusakomas molekuline difuzija, konvekcinės difuzijos įtaka maža. Tai aiškinama tuo, kad fazes skiriančiame paviršiuje sustiprėja trinties tarp fazių ir skystosios fazės paviršiaus įtempio jėgų stabdomasis veikimas.



16.2 pav. Skystosios fazės srauto greičio w ir ištirpusios medžiagos koncentracijos x kitimas turbulentiniame sraute

Hidrodinaminio pasienio sluoksnio prie fazių sąlyčio paviršiaus susidarymas sudaro sąlygas jame formuotis difuziniam pasienio sluoksniui, kurio storis δ_d ir nesutampa su pasienio sluoksnio storiu δ_h. Srauto branduolyje masė daugiausia pernešama turbulentinėmis pulsacijomis, todėl paskirstomosios medžiagos koncentracija srauto branduolyje yra beveik pastovi. Kaip anksčiau buvo minėta, medžiagos pernaša judančiomis ir turbulentinėse pulsacijose dalyvaujančiomis dalelėmis, vadinama turbulentine difuzija. Medžiagos pernaša turbulentine difuzija aprašoma lygtimi, analogiška (16.14a):

$$M = -(D + U \cdot l) \cdot F \cdot \partial c/\partial n = -(D + \varepsilon_d) \cdot F \cdot \partial c/\partial n; \qquad (16.17)$$

čia U – vidutinis pulsacinis skysčio srauto dalelių judėjimo skersine kryptimi greitis; l – atstumas, kuriuo pasislenka dalelės skersine kryptimi; $\varepsilon_d = U \cdot l$ – turbulentinės difuzijos koeficientas.

Įrodyta, kad pasienio sluoksnis daugiausia priešinasi pernašos procesui.

Pernaša pagal išnagrinėtą schemą vadinama masės atidavimu. Judėjimo režimui artėjant prie laminarinio, didėja pasienio sluoksnio storis, kol šis sluoksnis užpildo visą srauto skerspjūvį. Šiomis sąlygomis konvekcinė pernaša vyksta kryptimi, lygiagrečia su srauto judėjimu. Šiuo atveju masės pernaša link fazes skiriančios ribos daugiausia nusakoma molekuline difuzija. Bandymais įrodyta, kad konvekcinės masės pernašos greitis yra didesnis už molekulinės difuzijos greitį. Todėl, turbulentiškumui didėjant, konvekcinė masės pernaša spartėja.

Teoriškai difuzinio pasienio sluoksnio storį galima apskaičiuoti tik pačiais paprasčiausiais masės pernašos atvejais. Todėl pirmasis Fiko dėsnis procesui aprašyti gali būti taikomas tik apytiksliai, kadangi koncentracijos pasiskirstymo pasienio sluoksnyje $\partial c/\partial n$ dėsnis nežinomas:

$$M = -D \cdot F \cdot \tau \cdot \partial c/\partial n .$$

Masės atidavimas, kaip ir konvekcija, skirstomas į natūralųjį ir priverstinį. Natūralioji konvekcija vyksta, esant tankių skirtumui skirtinguose srauto taškuose. Priverstinį tekėjimą sukelia iš šalies srautui siurbliais arba maišyklėmis suteikta energija. Natūralios masės pernašos greitis daug mažesnis už

priverstinės pernašos greitį, todėl natūrali masės pernaša realiuose procesuose retai naudojama. Dažniausiai ji yra tik priverstinės masės pernašos palydovė.

Pagal analogija su empirine Niutono šilumos atidavimo lygtimi masės atidavimo lygtis gali būti užrašyta taip:

$$d^2M = \beta_x \cdot (x_p - x) \cdot dF \cdot d\tau ; \qquad (16.18)$$

čia β_x – proporcingumo arba masės atidavimo koeficientas.

Esant nuostoviam masės atidavimo nuo viso paviršiaus ploto procesui, kai $\tau = 1$ s, (16.18) lygtis užrašoma taip:

$$M = \beta_x \cdot (x_p - x) \cdot F . \qquad (16.18a)$$

Dujinės fazės V masės atidavimo lygtis analogiška (16.18a) lygčiai, pakeičiamos tik koncentracijos:

$$M = \beta_y \cdot (y - y_p) \cdot F . \qquad (16.19)$$

Naudojantis (16.18) ir (16.19) lygtimis, nustatomas masės atidavimo koeficiento matavimo vienetas:

$$[\beta_{y,x}] = \left[\frac{M}{F \cdot \Delta x, y}\right] = \left[\frac{kg \cdot m^3}{m^2 \cdot s \cdot kg}\right] = \left[\frac{m}{s}\right].$$

Masės atidavimo koeficientas parodo, kiek medžiagos pereina nuo fazes skiriančio paviršiaus ploto vieneto į srauto branduolį (arba atvirkščiai) per laiko vienetą, kai proceso varos jėga lygi vienetui.

Masės atidavimo koeficientas, skirtingai nuo masės perdavimo koeficiento, apibūdina medžiagos pernašos greitį fazės viduje tuo pačiu metu konvekcijos ir molekulinės difuzijos būdu. Masės atidavimo koeficientas priklauso nuo daugelio veiksnių (fizikinių fazių savybių, srauto greičio, apibrėžiančių geometrinių matmenų ir t. t.) ir yra šilumos atidavimo koeficiento analogas. Kadangi priklausomybė tarp masės atidavimo koeficientų ir anksčiau išvardytų veiksnių yra sudėtinga, todėl nėra apibendrintų lygčių β_y ir β_x skaičiuoti.

Paprastai, sudarant masės pernašos modelį, daromos prielaidos, kad fazių sąlyčio paviršiuje fazės yra pusiausviros, o bendras pasipriešinimas pernašos procesui susideda iš dviejų fazių pasipriešinimų sumos. Iš šių prielaidų išplaukia, kad fazes skiriančioje riboje pasipriešinimo procesui nėra (t. y. riboje pusiausvyra nusistovi labai greitai, greičiau, nei pasikeičia vidutinė koncentracija srauto branduolyje, kas yra įrodyta daugeliu masės pernašos procesų bandymų) ir kad masės pernašos procesas pavaldus fazių pasipriešinimų adityvumo taisyklei.

Kadangi masės mainuose dalyvaujančios fazės turi įtakos kitų fazių judėjimui, tai masės pernašos proceso greičio matematinis aprašymas yra labai sudėtingas. Todėl pernašos diferencialines lygtis (žr. 3 dalį) galima spręsti tik pačiais paprasčiausiais atvejais, kai tiksliai žinomas fazių sąlyčio paviršius ir kai fazių judėjimas yra laminarinis. Šiuo atveju proceso greitis apskaičiuojamas kartu sprendžiant pernašos lygtis kiekvienoje fazėje.

Masės pernašos mechanizmo modeliai. Literatūroje dažniausiai aprašomi šie modeliai: 1) plėvelinis (dviejų plėvelių), arba Ljuiso ir Uitmeno; 2) difuzinis pasienio sluoksnio; 3) fazių sąlyčio paviršiaus atsinaujinimo.

Plėvelinis (dviejų plėvelių), arba Ljuiso ir Uitmeno, modelis remiasi anksčiau, nagrinėjant kietuosius kūnus skysčiuose, pasiūlytomis Nernsto prielaidomis. Pagal šį modelį abiejose fazių kontakto paviršiaus pusėse susidaro nejudančios arba laminariniu būdu judančios plėvelės, kuriose medžiaga pernešama tik molekuline difuzija. Šios plėvelės fazių kontakto paviršių atskiria nuo srauto branduolio, kuriame koncentracija yra beveik pastovi; visi medžiagos koncentracijos pasikeitimai vyksta plėvelėje.

Pagal plėvelinį modelį suintegravus (16.14a) lygtį, gaunama tokia išraiška:

$$M = \left(D/\delta_{pl}\right)\cdot F\cdot\left(c_0 - c_{rib}\right); \qquad (16.20)$$

čia δ_{pl} – plėvelės storis; c_0 ir c_{rib} – vidutinė koncentracija fazės branduolyje ir fazes skiriančioje riboje.

Palyginę (16.20) lygtį su (16.18) ir (16.19) lygtimis, gauname:

$$\beta = D/\delta_{pl}\ . \qquad (16.21)$$

Iš (16.21) lygties matyti, kad β dydis yra atvirkščiai proporcingas plėvelės storiui, kuris nusakomas hidrodinaminėmis sąlygomis: kuo srautas turbulentiškesnis, tuo mažesnis δ_{pl} ir kartu didesnis β.

(16.21) lygtis taip pat rodo, kad pagal plėvelinį modelį tarp masės atidavimo ir difuzijos koeficientų egzistuoja tiesinis ryšys, kas dažnai patvirtinama bandymais. Bet ši teorija neįvertina fazių kontakto paviršiaus deformacijos ir medžiagos pernašos turbulentinėmis pulsacijomis.

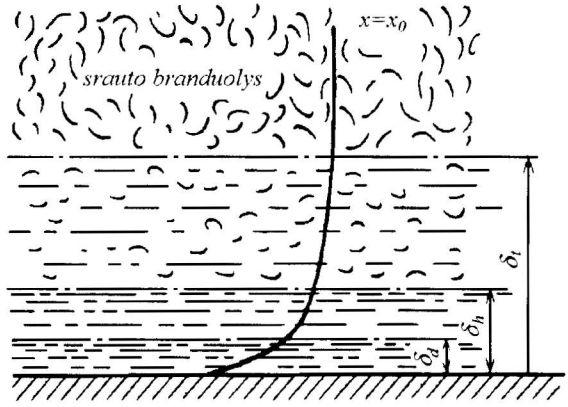
Difuzinio pasienio sluoksnio modelyje, kurį galima laikyti patobulintu plėveliniu modeliu, hidrodinaminių sąlygų įtaka masės pernašai yra ribota. Pagal šį modelį (16.3 pav.) srauto branduolyje pastovi medžiagos koncentracija turbulentiniame (buferiniame) pasluoksnyje, kurio storis δ_h, artėjant prie pasienio sluoksnio, laipsniškai mažėja

Buferiniame pasluoksnyje molekulinės ir turbulentinės klampos jėgos artimos, t. y. $\nu \approx \nu_t$. Mažėjant pulsacijų mastui klampiame pasluoksnyje, kurio storis δ_h, koncentracija mažėja greičiau. Klampiame pasluoksnio ir ploname

difuziniame pasluoksnyje, kurio storis δ_d, molekulinė pernaša yra pagrindinis masės pernašos būdas. Šiuo atveju $\nu >> \nu_t$. Pasienio difuzinio sluoksnio storis δ_d mažesnis už klampaus pasienio sluoksnio storį δ_h. Juos sieja tokia priklausomybė:

$$\delta_d = \delta_h \cdot (D/\nu)^{1/m}; \qquad (16.22)$$

čia m – laipsnio rodiklis, atspindintis turbulentinio pernašos mažėjimo arti fazes skiriančios ribos dėsnį.



16.3 pav. Pasienio difuzinio sluoksnio schema

Sistemoms *skystis–kietasis kūnas* $m = 3$, o sistemoms *dujos (garai)–skystis* ir *skystis–skystis* $m = 2$. Todėl iš (16.20) ir (16.22) lygčių sistemose *kietasis kūnas–skystis* per vieną sekundę perneštas masės kiekis $M \approx D^{0,66}$, o sistemose *dujos (garai)–skystis* ir sistemose *skystis–skystis* $M \approx D^{0,5}$.

Fazių sąlyčio paviršiaus atsinaujinimo modelis dažnai vadinamas skverbties, arba penetraciniu, modeliu. Pagal šį modelį laikoma, kad turbulentinės pulsacijos nuolat tiekia į fazes skiriantį paviršių šviežią skystį ir nuplauna jau sureagavusio su dujomis (garais) skysčio porcijas, t. y. kiekvienas skysčio paviršiaus elementas su dujomis arba garais reaguoja tik tam tikrą laiką τ, kuris vadinamas kontakto, arba atsinaujinimo, trukme. Praėjus šiam laikui, tiriamasis elementas atsinaujina. Pagal šį modelį laikant, kad visų paviršiaus elementų kontakto trukmė yra pastovi, išvesta lygtis, iš kurios apskaičiuojamas masės atidavimo koeficientas:

$$\beta = 2 \cdot [D/(\pi \cdot \tau)]^{0,5}. \qquad (16.23)$$

Iš (16.23) lygties matyti, kad, skirtingai nuo plėvelinio modelio, pernašos greitis pagal skverbties modelį, kaip ir pagal pasienio sluoksnio difuzinį modelį, $M \approx D^{0,5}$, ir tai dažnai patvirtinama bandymais.

Laikant, kad kontakto trukmė yra pastovi, per tą laiką medžiaga pernešama tiek molekulinės, tiek turbulentinės difuzijos būdu. Tai aprašoma (16.23) lygtimi. Tačiau molekulinės difuzijos koeficientas (16.23) lygtyje pakeičiamas molekulinės ir turbulentinės difuzijos koeficientų suma ir žymimas D_{ef}.

Pasiūlyta ir daugiau masės pernašos mechanizmo modelių. Reikia pasakyti, kad anksčiau pasiūlytus modelius procesams skaičiuoti galima naudoti tik daliniais atvejais, kadangi dėl turbulentinių difuzinių srautų sudėtingumo juose beveik negalima nustatyti fazių sąlyčio paviršiaus, koncentracijų pasiskirstymo fazėse ir kitų skaičiavimui reikalingų parametrų.

16.5. Diferencialinės masės pernašos proceso lygtys

Masės konvekcinės pernašos proceso lygtims išvesti panaudojama pagrindinė substancijos pernašos lygtis (3.27):

$$\partial\varphi/\partial\tau = -div\,\vec{q} + \gamma;$$

čia φ – masės pernašos potencialas; q – masės srauto tankis; γ – masės pernašos šaltinio intensyvumas (laikoma, kad $\gamma = 0$, t. y. papildoma masė į srautą netiekiama).

Masės pernašos potencialas yra koncentracijų skirtumas arba pokytis, todėl $\partial\varphi/\partial\tau = \partial c/\partial\tau$.

Srauto tankis $\vec{q}$ susideda iš dviejų dedamųjų:

$$\vec{q} = \vec{q}_M + \vec{q}_k. \qquad (16.24)$$

(16.24) lygtyje dydis $\vec{q}_M = -D \cdot grad\, c$ atspindi masės molekulinės pernašos tankį (pirmasis Fiko dėsnis (3.14)), o $\vec{q}_k = \vec{W} \cdot c$ yra masės konvekcinio srauto tankis.

Tada substancijos pernašos pagrindinė lygtis, pritaikyta masės pernašai, užrašoma taip:

$$\partial c/\partial\tau = D \cdot div\, grad\, c - div\,\vec{W} \cdot c; \qquad (16.25)$$

$$div\,\vec{W}\cdot c=\frac{\partial(W_x c)}{\partial x}+\frac{\partial(W_y\cdot c)}{\partial y}+\frac{\partial(W_z\cdot c)}{\partial z}=$$
$$=c\cdot\left(\frac{\partial W_x}{\partial x}+\frac{\partial W_y}{\partial y}+\frac{\partial W_z}{\partial z}\right)+W_x\cdot\frac{\partial c}{\partial x}+W_y\cdot\frac{\partial c}{\partial y}+W_z\cdot\frac{\partial c}{\partial z}. \qquad (16.26)$$

Kadangi, esant vientisam srautui, dydis $(\partial W_x/\partial x)+(\partial W_y/\partial y)+(\partial W_z/\partial z)=0$, tai (16.25) lygtis užrašoma taip:

$$div\,\vec{W}\cdot c=W_x\cdot\frac{\partial c}{\partial x}+W_y\cdot\frac{\partial c}{\partial y}+W_z\cdot\frac{\partial c}{\partial z}. \qquad (16.27)$$

(16.25) lygtyje *div grad c* dydis išreiškiamas taip:

$$div\,grad\,c=\frac{\partial(grad\,c)}{\partial x}+\frac{\partial(grad\,c)}{\partial y}+\frac{\partial(grad\,c)}{\partial z}=$$
$$=\frac{\partial^2 c}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 c}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 c}{\partial z^2}=\nabla^2 c. \qquad (16.28)$$

Po pertvarkymų (16.25) lygtis tampa (3.46) diferencialine konvekcinės difuzijos lygtimi

$$\frac{\partial c}{\partial\tau}+W_x\cdot\frac{\partial c}{\partial x}+W_y\cdot\frac{\partial c}{\partial y}+W_z\cdot\frac{\partial c}{\partial z}=D\cdot\nabla^2 c,$$

kuri bendruoju pavidalu išreiškia komponento koncentracijos pasiskirstymą judančiame sraute, kai masės pernašos procesas yra nenuostovusis.

Vykstant masės pernašai nejudančioje terpėje, kai $W_x=W_y=W_z=0$, (3.46) lygtis užrašoma taip:

$$\partial c/\partial\tau=D\cdot\nabla^2 c. \qquad (16.29)$$

(16.29) lygtis vadinama diferencialine molekulinės difuzijos lygtimi, arba antruoju Fiko dėsniu. Jis aprašo medžiagos koncentracijos pasiskirstymą molekulinės difuzijos būdu nejudančioje aplinkoje.

Reikia pasakyti, kad konvekcinės difuzijos lygtis, kai masė pernešama sraute, turi būti papildyta srauto judėjimo (Navjė ir Stokso) ir nepertraukiamo srauto arba srauto vientisumo lygtimis. Be to, dėl medžiagos pernašos keičiasi fazių sudėtis, o kartu ir fizikinės savybės. Todėl konvekcinę pernašą aprašančių diferencialinių lygčių sistemą taip pat reikia papildyti lygtimis, išreiškiančiomis fazės fizikinių savybių priklausomybę nuo jos sudėties. Tokios sistemos lygtys yra gana sudėtingos, todėl jas analitiškai spręsti praktiškai tikslin-

ga tik tais atvejais, kada jas iš esmės galima suprastinti. Todėl dažnai šiai lygčių sistemai spręsti taikomi panašumo teorijos metodai.

16.6. Masės mainų procesų panašumas

Diferencialinių šilumos (3.40) ir masės (16.25) mainų lygčių panašumas leidžia teigti, kad pagrindiniai masės mainų panašumo kriterijai turi būti analogiški pagrindiniams šilumos mainų kriterijams.

Panagrinėsime masės mainų procesus fazes skiriančiame paviršiuje. Iš vienos fazės į kitą pereinantis masės kiekis

$$M = \beta_y \cdot \left(y - y_p^*\right);$$

čia y_p^* – pusiausvira koncentracija fazes skiriančiame paviršiuje.

Toks pat masės kiekis per pasienio sluoksnį pernešamas ir molekulinės difuzijos būdu:

$$M = -D \cdot \partial y / \partial n .$$

Šiose lygtyse sunkiai nustatomi dydžiai yra y_p^* ir n – pasienio sluoksnio, per kurį molekuline difuzija pernešama medžiaga, storis. Iš čia gauname:

$$\beta_y \cdot \left(y - y_p^*\right) = -D \cdot \partial y / \partial n ,$$

arba $\beta_y \cdot \Delta y = -D \cdot \partial y / \partial n$;

čia $y - y_p^* = \Delta y$.

Kiekvieną lygties narį padauginsime iš mastelio daugiklio arba panašumo koeficiento a:

$$a_\beta \cdot a_c \cdot \left(\beta_y \cdot \Delta y\right) = \left(a_c \cdot a_D / a_l\right) \cdot \left(-D \cdot \partial y / \partial n\right).$$

Tada $a_l \cdot a_\beta / a_D = 1$; iš čia $\beta \cdot l / D = Nu'$, kur l – geometrinis nusakomasis parametras.

Užrašytas bedimensis kompleksas yra šiluminio Nuselto ($Nu = \alpha \cdot l / \lambda$) kriterijaus analogas ir todėl vadinamas difuziniu Nuselto kriterijumi (kai kada – Šervudo kriterijumi *Sh*). Nuselto kriterijus Nu' yra nusakomasis arba apibūdinamasis kriterijus, nes į jo išraišką įeina β. Kadangi $Nu' \approx \beta \cdot l / D$, tai Nu' apibūdinamas medžiagos pernašos greičių santykiu (konvekciniu ir molekulinės difuzijos būdu – β) su molekuline pernaša (D).

Kitus masės mainų procesų panašumo kriterijus gausime iš diferencialinės konvekcinės difuzijos lygties (16.25). Parašius (16.25) lygtį abscisei

$$(\partial c/\partial \tau)+(W_x \cdot \partial c/\partial x) = D \cdot \partial^2 c/\partial x^2$$

ir atlikus pertvarkymus, panašius į atliktus įrodant hidrodinaminių ir šilumos mainų procesų panašumą, gaunami tokie panašumo kriterijai:

- $\tau \cdot D/l^2 = Fo'$ – difuzinis Furjė panašumo kriterijus (analogas šiluminiam panašumo kriterijui $Fo = \tau \cdot \alpha/l^2$), kuris apibūdina nenuostovių arba nestacionariųjų masės mainų procesų panašumą;
- $W \cdot l/D = Pe'$ – difuzinis Peklė kriterijus (analogas Peklė šiluminiam panašumo kriterijui $Pe = W \cdot l/\alpha$).

Kriterijus $Pe' \approx W \cdot l/D$ apibūdina panašių sistemų atitinkamuose taškuose medžiagos pernašos konvekcija (W) santykį su molekuline pernaša (D). Dažnai Pe' kriterijus pakeičiamas santykiu

$$Pe'/Re = (W \cdot l/D)/(W \cdot l/\nu) = \nu/D = Pr' .$$

Difuzinis Prandtlio kriterijus Pr' yra šiluminio Prandtlio kriterijaus $Pr = \nu/a$ analogas (kai kada kriterijus Pr' yra vadinamas Šmidto kriterijumi Sc).

Formaliai Prandtlio kriterijus Pr' išreiškia skysčio arba dujų fazės fizikinių savybių santykio atitinkamuose panašių sistemų taškuose pastovumą. Iš esmės Pr' kriterijus apibūdina greičių profilio (išreikšto ν) santykį su koncentracijų profiliu (išreikštu D), t. y. hidrodinaminio pasienio sluoksnio storio santykį su difuzinio pasienio sluoksnio storiu.

Kad lyginamose sistemose vyktų panašūs masės mainų procesai, būtina, kad juose tarp srautų būtų išlaikytas taip pat ir hidrodinaminis panašumas. Todėl nenuostoviojo masės atidavimo proceso kriterijų lygtis užrašoma taip:

$$Nu' = f(Fo', Re, Pr', Ga, \Gamma_1, \Gamma_2, \ldots);$$

čia Γ – geometrinis simpleksas (žr. 5 dalį).

Tiriant panašius nuostoviuosius procesus, kuriems įtakos neturi sunkio jėga (t. y. $Fo' = 0$ *ir* $Ga = 0$),

$$Nu' = f(Re, Pr', G_1, G_2, \ldots),$$

pvz., $$Nu' = A \cdot Re^n \cdot (Pr')^m \cdot \Gamma_1^q \cdot \Gamma_2^p ; \qquad (16.30)$$

čia A, n, m, q, p – dydžiai, nustatomi bandymais.

(16.30) lygtis yra apibendrinta masės mainų procesų kriterijų lygtis. Kadangi ji analogiška šilumos mainų kriterijų lygčiai (12.72), tai, esant vienodoms hidrodinaminėms sąlygoms,

$$Nu/Nu' = (Pr/Pr')^m . \qquad (16.31)$$

Naudojantis (16.31) lygtimi, galima nustatyti šilumos atidavimo koeficiento santykį su masės atidavimo koeficientu:

$$\beta = (\alpha \cdot D/\lambda)\cdot(\alpha/D)^m . \qquad (16.31a)$$

Pagal šį santykį ir, pvz., pagal žinomą šilumos atidavimo koeficientą α, galima apskaičiuoti masės atidavimo koeficientą β, esant toms pačioms proceso hidrodinaminėms sąlygoms.

16.7. Masės mainų procesų varos jėga

Pagal antrąjį termodinamikos dėsnį uždaros sistemos būsena, kai sąveikauja dvi fazės, artėja prie pusiausvyros (žr. 2 dalį); tai apibūdinama fazių cheminių potencialų lygybe. Šiuo atveju masės pernašos varos jėga yra vieno ar kito komponento cheminių potencialų skirtumas. Kaip buvo minėta antrojo dalyje, neidealių sistemų cheminius potencialus nustatyti gana sunku, todėl, tiriant ir skaičiuojant masės pernašos procesus, paprastai nagrinėjamas ne cheminių potencialų, o komponentų koncentracijų, kurias nustatyti gerokai paprasčiau, kitimas.

Paprastai darbinės koncentracijos, srautams įtekant į sistemą ir iš jos ištekant, būna žinomos arba apskaičiuojamos pagal medžiagų balanso lygtis. Darbinių koncentracijų kitimas masės mainų paviršiuje aprašomas darbo linijų lygtimis. Šios lygtys naudojamos proceso varos jėgai nustatyti visame masės perdavimo paviršiuje F, taip pat masės mainų aparatų aukščiui H nustatyti.

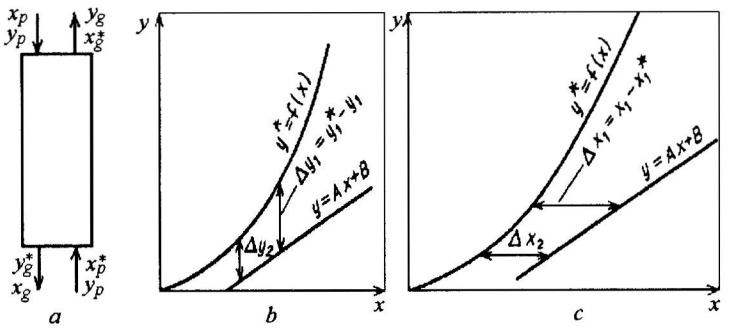
Masės pernašos procesas, esant skirtumui tarp darbo ir pusiausvyros koncentracijų (esant tiriamomis sąlygomis nurodytai temperatūrai ir slėgiui), kurias galima pažymėti y ir y^* – dujų fazei ir x bei x^* – skysčio fazei, vyksta savaime.

Skirtumas tarp darbo ir pusiausvyros koncentracijų konkrečiomis sąlygomis ir yra masės mainų procesų varos jėga.

Varos jėga koncentracijomis dujose išreiškiama taip: $\Delta y = y - y^*$, kai $y > y^*$, arba $\Delta y = y^* - y$, kai $y < y^*$, o kai išreiškiama koncentracija skystyje, – $\Delta x = x - x^*$ arba $\Delta x = x^* - x$. Masės mainų procesų varos jėga, kai juose dalyvauja dujos, gali būti išreiškiama dalinių slėgių skirtumu.

Taigi, varos jėga parodo sistemos nukrypimo nuo pusiausvyros būsenos laipsnį. Nusistovėjus fazių pusiausvyrai, masės mainų procesas nutrūksta.

Kaip ir šilumos mainų atveju, masės mainų procesų varos jėgos dydis priklauso nuo reliatyvios fazių judėjimo krypties (priešsrovinis, pasrovinis ir kt.). Be to, varos jėgos dydžiui didelę įtaką turi hidrodinaminė srautų struktūra.



16.4 pav. Priešsrovinio masės perdavimo proceso varos jėgos nustatymas grafiniu būdu: *a* – srautų schema, *b* ir *c* – masės mainų procesų varos jėga, išreikšta atitinkamai koncentracija dujose ir koncentracija skystyje

Panagrinėsime variantą, kai fazės viena kitos atžvilgiu juda priešpriešiais, aparatas dirba nuostoviuoju režimu, srautų struktūros hidrodinaminis modelis – *IIM* (16.4 pav., *a*). Tariame, kad medžiaga pernešama iš skysčio srauto į dujų srautą, t. y. $y < y^*$. Šiuo atveju pusiausvyros linija yra žemiau darbo linijos (16.4 pav., *b*).

Kiekviename taške arba aparato skerspjūvyje $\Delta y = y - y^*$, t. y. gausime Δy_1, Δy_2 ir t. t. Šiuo atveju proceso varos jėgą išreikšime koncentracija skystyje (16.4 pav., *c*). Tada $\Delta x = x - x^*$, t. y. $\Delta x_1 = x_1 - x_1^*$, Δx_2 ir t. t.

Iš čia matyti, kad fazių sąlyčio paviršiuje kintant darbinei koncentracijai, kinta ir varos jėga. Todėl turi būti apskaičiuota vidutinė visam procesui (arba visam masės perdavimo paviršiui) reikalinga varos jėga. Išvedimui supaprastinti tariame, kad aparatas dirba pagal priešsrovinę idealaus išstūmimo schemą. Pusiausvyros linija yra tiesė (t. y. $y^* = m \cdot x$), $m > 1$ ir medžiaga pernešama iš fazės *L* į fazę *V* (iš skysčio į dujas) (16.5 pav.).

Toks pat uždavinys buvo nagrinėjamas vadovėlio 12-oje dalyje, išvedant šilumos perdavimo procesų varos jėgą. Todėl pagal analogiją su šilumos pernaša galima užrašyti tokias masės pernašos proceso varos jėgos Δy_{vid} *ir* Δx_{vid} išraiškas:

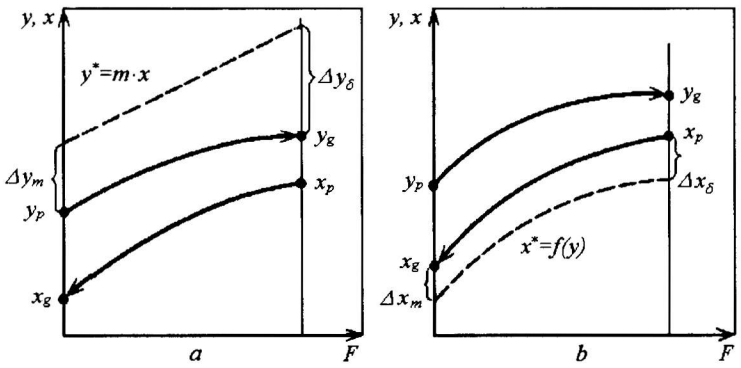
- koncentracijos dujose matavimo vienetais (16.5 pav., *a*):

$$\Delta y_{vid} = \left(\Delta y_{max} - \Delta y_{min}\right) / ln\left(\Delta y_{max} / \Delta y_{min}\right), \qquad (16.32)$$

- koncentracijos skystyje matavimo vienetais (16.5 pav., *b*):

$$\Delta x_{vid} = \left(\Delta x_{max} - \Delta x_{min}\right) / ln\left(\Delta x_{max} / \Delta x_{min}\right); \qquad (16.32a)$$

čia Δy_{max} *ir* Δx_{max} – didžiausias, o Δy_{min} *ir* Δx_{min} – mažiausias koncentracijų skirtumas masės mainų aparato galuose.



16.5 pav. Masės perdavimo proceso varos jėgos grafinis nustatymas: *a* – koncentracijos dujose matavimo vienetais *y*; *b* – koncentracijos skystyje matavimo vienetais *x*

Kai $\Delta y_{max} / \Delta y_{min} < 2$, vidutinė proceso varos jėga nustatoma kaip aritmetinis vidurkis, t. y.

$$\Delta y_{vid} = 0{,}5 \cdot \left(\Delta y_{max} + \Delta y_{min}\right).$$

Analogiškos išraiškos bus gaunamos ir esant tiesiasroviam masės mainuose dalyvaujančių fazių judėjimui. Bendresnė priklausomybė varos jėgai nustatyti, kai pusiausvyros linija yra kreivė ir srautų struktūra skiriasi nuo *IIM*, bus nagrinėjama toliau (16.8.2 sk.).

16.8. Masės mainų aparatų skaičiavimo pagrindai

Atliekant masės mainų aparatų technologinius skaičiavimus, nustatomas aparato skersmuo (jeigu aparatas cilindro formos) ir aukštis arba ilgis. Aparato skersmuo arba skerspjūvis atspindi jo našumą, o aukštis – aparate vykstančio proceso intensyvumą. Dažnai, apskaičiavus masės mainų aparato skersmenį ir aukštį, reikia nustatyti jo hidraulinį pasipriešinimą. Tokio skaičiavimo principai buvo pateikti šeštoje dalyje. Toliau bus pateikiamos konkrečios lygtys šių aparatų hidrauliniam pasipriešinimui apskaičiuoti.

16.8.1. Masės mainų aparato skersmens skaičiavimas

Masės mainų aparato skersmuo D arba skerspjūvio plotas S apskaičiuojamas pagal tūrio debito lygtį:

$$V = S \cdot W_0 ;$$

čia V – vientisos fazės tūrio debitas, m^3/s; W_0 – tos pačios fazės pasirinktas arba tikrasis apskaičiuotas arba fiktyvus, t. y. apskaičiuotas visam aparato skerspjūviui, srauto greitis, m/s.

Iš masės mainų aparatų labiausiai yra paplitę taisyklingo skritulio skerspjūvio aparatai, pvz., kolonos. Jų debito lygtis užrašoma taip:

$$V = \left(\pi \cdot D^2/4\right) \cdot W_0 ;$$

iš čia $D = \left[4 \cdot V/\left(\pi \cdot W_0\right)\right]^{0,5}$. (16.33)

Debito V vertė būna duota arba ją nesunku apskaičiuoti, sprendžiant medžiagų arba šilumos balanso lygtis.

W_0 parinkti arba apskaičiuoti gerokai sunkiau, nes nuo W_0 vertės labai priklauso ne tik aparato skersmuo, bet ir jo aukštis (kadangi W_0 vertė turi įtakos β_y ir β_x vertėms), hidraulinis pasipriešinimas, taip pat purslų išnešimas. Jeigu hidraulinis pasipriešinimas neturi įtakos, tai, parenkant greitį, jo vertę reikia imti artimą ribinei, kurią sąlygoja užspringimo taškas. Daugeliui masės mainų atvejų yra nustatytos (dažniausiai empirinės) lygtys užspringimo greičiui apskaičiuoti. Lygtys kai kuriems aparatams skaičiuoti bus pateiktos toliau. Jeigu į aparatų hidraulinį pasipriešinimą būtina atsižvelgti (pvz., vykstant absorbcijai atmosferos slėgyje), tai reikia atlikti techninius ekonominius skaičiavimus ir pagal jų rezultatus parinkti optimalų vientisosios fazės greitį W_0.

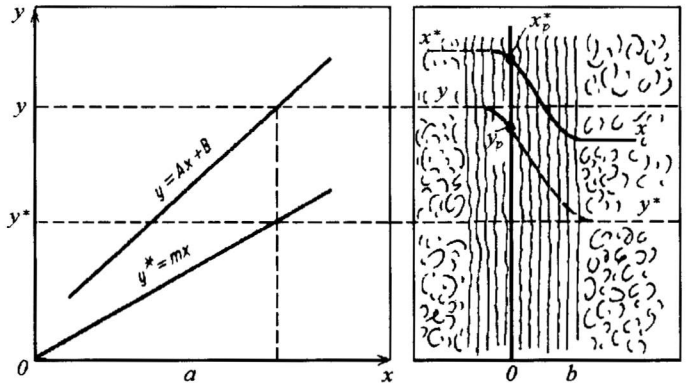
16.8.2. Masės mainų aparato aukščio skaičiavimas

Toliau pateikti masės mainų aparatų aukščio skaičiavimo metodai. Pagal koncentracijos kitimą fazėse skiriami aparatai su vientisu fazių kontakto paviršiumi ir aparatai su pakopiniu fazių kontakto paviršiumi. Abiejų tipų aparatų skaičiavimas remiasi bendrais masės mainų procesų kinetiniais dėsningumais, kurie gali būti išreiškiami įvairiais būdais: masės perdavimo lygtimis, masės perdavimo vieneto aukščiu ir kt.

Aparato aukštis priklauso nuo proceso intensyvumo arba greičio, o šie – nuo perdavimo koeficiento vertės. Prieš skaičiuodami aparato aukštį, aptarsime masės perdavimo koeficientų ryšį su masės atidavimo koeficientais.

Masės perdavimo koeficientų skaičiavimas. Nagrinėsime masės perdavimo procesą (16.6 pav.), kai pusiausvyros linija yra tiesė, t. y. $y^* = m \cdot x$, ir

darbo linija taip pat aprašoma tiesės lygtimi $y = A \cdot x + B(x)$ (čia $y > y^*$), t. y. procesas vyksta iš dujinės fazės V į skystąją fazę L ($x < x^*$).



16.6 pav. Masės perdavimo proceso darbo bei pusiausvyros koncentracijų priklausomybė (*a*) ir proceso schema (*b*)

Laikoma, kad fazių sąlyčio paviršiuje nusistovi pusiausvyra (16.6 pav., *b*), t. y. masės pernaša beveik nevyksta ir todėl fazes skiriančiame paviršiuje pasipriešinimas masės pernešimui prilyginamas nuliui. Tokiu atveju suminis pasipriešinimas masės perdavimui prilyginamas pasipriešinimų masės perdavimui abiejose fazėse sumai. Tariame, kad fazių pusiausvyros konstanta mažesnė už vienetą ($m < 1$). Šiuo atveju darbo linija bus išdėstyta virš pusiausvyros linijos (16.6 pav., *a*), arba koncentracijų skystojoje fazėje x linija bus aukščiau koncentracijų dujų fazėje y linijos (16.6 pav., *b*).

Dujų fazėje sąlyčio paviršiui atiduotas masės kiekis dM apskaičiuojamas pagal lygtį

$$dM = \beta_y \cdot (y - y_p) \cdot dF, \qquad (16.34)$$

o skysčio fazėje L

$$dM = \beta_x \cdot (x - x_p) \cdot dF. \qquad (16.34a)$$

(16.34a) lygtyje padarę pakeitimus $x_p = y_p / m$ ir $x = y^* / m$, gauname:

$$dM = \beta_x \cdot \left[(y_p^* / m) - (y^* / m) \right] \cdot dF = \\ = (\beta_x / m) \cdot (y_p^* - y^*) \cdot dF. \qquad (16.34b)$$

Iš (16.34) ir (16.34b) lygčių išreiškiame pasipriešinimą kiekvienoje fazėje:

$$1/\beta_y = dF \cdot (y - y_p)/dM\,, \quad m/\beta_x = dF \cdot (y_p^* - y^*)/dM\,.$$

Sudėję šias išraiškas, kairėje pusėje gauname bendrą pasipriešinimą masės pernašai R_y:

$$(1/\beta_y) + (m/\beta_x) = R_y = dF \cdot (y - y^*)/dM\,.$$

Iš šios lygties išreiškiame per paviršių dF perneštos masės kiekį dM:

$$dM = \frac{1}{(1/\beta_y) + (m/\beta_x)} \cdot (y - y^*) \cdot dF\,,$$

bet

$$\frac{1}{(1/\beta_y) + (m/\beta_x)} = \frac{1}{R_y} = K_y\,, \qquad (16.34c)$$

arba $1/K_y = (1/\beta_y) + (m/\beta_x)$. (16.35)

(16.35) lygtis išreiškia fazių pasipriešinimų adityvumą. Jį įvertinus, (16.34c) lygtis užrašoma taip:

$$dM = K_y \cdot dF \cdot (y - y^*).$$

Visam masės perdavimo paviršiui F

$$M = K_y \cdot F \cdot (y - y^*). \qquad (16.36)$$

Kai proceso varos jėga skaičiuojama koncentracijomis (x) skystojoje fazėje, tai (16.34) lygtis užrašoma taip:

$$dM = \beta_y \cdot (m \cdot x^* - m \cdot x_p^*) \cdot dF = \beta_y \cdot m \cdot (x^* - x_p^*) \cdot dF\,,$$

arba $1/(\beta_y \cdot m) = dF \cdot (x^* - x_p^*)/dM$.

Įvertinus tai, kad $x_p = x_p^*$, (16.34a) lygtis užrašoma taip:

$$1/\beta_x = dF \cdot (x_p^* - x)/dM\,.$$

Sudėję kairiąsias ir dešiniąsias gautų lygčių puses, gauname tokią lygtį:

$$[1/(\beta_y \cdot m)] + (1/\beta_x) = 1/R_x = dF \cdot (x^* - x)/dM\,.$$

Iš šios lygties išreiškiamas dydis *dM*:

$$dM = \frac{1}{\left[1/(\beta_y \cdot m)\right] + (1/\beta_x)} \cdot (x^* - x) \cdot dF ,$$

arba $dM = K_x \cdot (x^* - x) \cdot dF$.

Visam paviršiui *F*

$$M = K_x \cdot F \cdot \Delta x_{vid} ; \qquad (16.37)$$

$$\text{čia } K_x = \frac{1}{\left[1/(\beta_y \cdot m)\right] + (1/\beta_x)} . \qquad (16.38)$$

Taigi masės perdavimo koeficientai K_y ir K_x priklauso nuo masės atidavimo koeficientų β_y ir β_x. Jeigu koeficientas β_x labai didelis, tai $1/\beta_y >> m/\beta_x$ ir $K_y \approx \beta_y$, t. y. procesą ribojanti stadija yra difuzinis pasipriešinimas dujinėje fazėje *V*. Jeigu β_y ir *m* dideli, tai $1/\beta_x >> 1/(m \cdot \beta_y)$ ir $K_x \approx \beta_x$, t. y. ribojančioji stadija yra difuzinis pasipriešinimas skystojoje fazėje *L*.

Tūriniai masės perdavimo koeficientai. (16.36) ir (16.37) lygtyse esantys masės perdavimo koeficientai ir į juos įeinantys masės atidavimo koeficientai (žr. (16.35) ir (16.38) lygtis) yra apskaičiuoti arba skirti fazių kontakto paviršiaus ploto vienetui. Kartu su tuo fazių sąlyčio paviršių pramoniniuose masės mainų aparatuose nustatyti daug sunkiau negu šilumokaičių šilumos mainų paviršių (ypač masinio barbotažo metu išpurškiančiuose aparatuose ir pan.). Todėl skaičiuojant masės mainų aparatus, naudojama nemaža priemonių, kad nereikėtų nustatyti fazių sąlyčio paviršiaus. Šiuo atveju pagrindine aparato technine charakteristika gali būti laikomas jo tūris *V* arba aukštis *H*, arba fazių kontakto pakopų (laipsnių) skaičius.

Jeigu pagrindine aparato charakteristika laikomas jo tūris, tai fazių sąlyčio paviršius *F* gali būti užrašytas taip:

$$F = V \cdot a ; \qquad (16.39)$$

čia *a* – savitasis fazių sąlyčio paviršiaus plotas, (t. y. paviršiaus plotas, susidarantis viename kubiniame metre aparato), m^2/m^3.

Paviršiaus plotas *F* gali būti išreikštas iš pagrindinės masės perdavimo lygties:

$$F = M/(K_y \cdot \Delta y_{vid}) .$$

Tuomet (16.39) lygtis, pertvarkyta tūrio *V* atžvilgiu, užrašoma taip:

$$V = F/a = M/\left(K_y \cdot a \cdot \Delta y_{vid}\right). \qquad (16.40)$$

Pažymime $K_{y,V} = K_y \cdot a$. Koeficientas $K_{y,V}$ pagal prasmę turi būti pavadintas tūriniu masės perdavimo koeficientu. Išvesime jo matavimo vienetą, kai Δy_{vid} matuojama kg/m^3:

$$[K] = \left[\frac{M}{V \cdot a \cdot \Delta y_{vid}}\right] = \left[\frac{kg \cdot m^3 \cdot m^3}{s \cdot m^3 \cdot m^2 \cdot kg}\right] = \left[\frac{m}{s}\right].$$

Perrašysime (16.40) lygtį iš fazės į fazę pernešto masės kiekio atžvilgiu:

- dujinei fazei:

$$M = K_{yV} \cdot V \cdot \Delta y_{vid}; \qquad (16.41)$$

- skystajai fazei:

$$M = K_{xV} \cdot V \cdot \Delta x_{vid}. \qquad (16.41a)$$

Pagal (16.41) ir (16.41a) lygtis, kurios vadinamos modifikuotomis masės perdavimo lygtimis, skaičiuojant V_a, prieš tai nustatomi tūriniai masės atidavimo koeficientai β_{yV} ir β_{xV}, po to tūriniai masės perdavimo koeficientai K_{yV} arba K_{xV}, o toliau ieškomas aparato darbinis tūris V, kurį žinant galima apskaičiuoti aparato darbo dalies aukštį H (kai žinomas jo skersmuo).

Masės atidavimo lygtys šiuo atveju įgauna į (16.18a) ir (16.19) lygtis panašias išraiškas:

$$M = \beta_y \cdot a \cdot V \cdot \left(y - y_p^*\right) = \beta_{yV} \cdot V \cdot \left(y - y_p^*\right) \qquad (16.42)$$

ir $$M = \beta_x \cdot a \cdot V \cdot \left(x - x_p^*\right) = \beta_{xV} \cdot V \cdot \left(x - x_p^*\right). \qquad (16.43)$$

K_{yV} ir K_{xV} vertės nustatomos pagal fazių pasipriešinimų adityvumo lygtis (16.35) ir (16.38).

Aparato aukščio skaičiavimas naudojant masės perdavimo lygtis. Šio skaičiavimo eiga tokia:

1) pagal masės perdavimo lygtį apskaičiuojamas fazių sąlyčio paviršiaus plotas F:

$$F = M/\left(K \cdot \Delta\right);$$

2) fazių sąlyčio paviršiaus plotas išreiškiamas fazių savitojo sąlyčio paviršiaus ploto ir fazių mišinio tūrio sandauga:

$$F = a \cdot V_m;$$

3) mišinio tūris prilyginamas aparato skerspjūvio ploto, statmeno terpės arba vientisosios fazės judėjimo krypčiai, ir fazių mišinio sluoksnio storio sandaugai:

$$V_m = 0{,}786 \cdot d^2 \cdot H_m;$$

4) pagal šią lygtį apskaičiuojamas mišinio sluoksnio storis H_m;

5) prie apskaičiuoto aukščio pridėjus pagal konstrukciją reikalingų aukščių sumą, apskaičiuojamas visas aparato aukštis.

Šiose lygtyse M – per fazių paviršių F per 1 sekundę perduodama paskirstomosios medžiagos masė, kg arba kmol, apskaičiuojama pagal anksčiau pateiktas medžiagų balanso lygtis; V_m – mišinio (įkrautiniuose aparatuose – įkrovos) tūris, m^3; K – masės perdavimo koeficientas, m/s, apskaičiuojamas pagal (16.71) lygtį; Δ – proceso varos jėga (16.7 sk.); a – savitasis fazių sąlyčio paviršius, m^2/m^3 (skaičiuojant įkrautinius aparatus prilyginamas įkrovos savitajam paviršiui, žr. 17 dalį); d – aparato skersmuo, m.

Šis metodas dažniausiai taikomas, skaičiuojant aparatų, kuriuose fazės tolydžiai sąveikauja, pvz., įkrautinių aparatų, aukščius.

Aparato aukščio skaičiavimas naudojant pernašos vienetų aukštį ir skaičių. Kai pagrindine masės mainų aparato charakteristika laikomas jo aukštis H, tariama, kad tarp sunkiai nustatomo dydžio F ir aparato aukščio yra tokia priklausomybė:

$$F = V_a \cdot a = H \cdot (S \cdot a);$$

čia S – aparato skerspjūvio plotas, apskaičiuojamas pagal debito lygtį.

Iš šios lygties $H = F/(S \cdot a)$. (16.44)

Masės mainų paviršiaus plotas apskaičiuojamas naudojant masės perdavimo lygtį: dujinei fazei V (16.35) ir skystajai fazei – (16.35). Iš jų atitinkamai gaunama:

$$H = M/(K_y \cdot S \cdot a \cdot \Delta y_{vid}), \qquad H = M/(K_x \cdot S \cdot a \cdot \Delta x_{vid}).$$

Bet $M = V \cdot (y_p - y_g)$ ir $M = L \cdot (x_g - x_p)$. Tada

$$H = [V/(K_y \cdot S \cdot a)] \cdot (y_p - y_g)/\Delta y_{vid} \text{ ir}$$

$$H = [L/(K_x \cdot S \cdot a)] \cdot (x_g - x_p)/\Delta x_{vid}. \qquad (16.45)$$

Pažymima:

$$(y_p - y_g)/\Delta y_{vid} = n_{0y} \text{ ir } (x_g - x_p)/\Delta x_{vid} = n_{0x}. \qquad (16.46)$$

Tada pagal prasmę n_{0y} ir n_{0x} yra bendras masės pernašos vienetų skaičius (*MPVS*) – tarp fazių pasiskirsčiusios medžiagos darbo koncentracijos pasikeitimas, atitinkantis proceso varos jėgos vienetą. Taigi masės perdavimo vienetų skaičius atvirkščiai proporcingas vidutinei masės perdavimo proceso varos jėgai.

Pažymėsime (žr. (16.45) lygtį) dydžius

$$\left[V/\left(K_y \cdot S \cdot a\right)\right] = h_{0y} \quad \text{ir} \quad \left[L/\left(K_x \cdot S \cdot a\right)\right] = h_{0x}, \tag{16.47}$$

kurie pagal prasmę reiškia masės mainų aparato aukštį, ekvivalentišką vienam masės perdavimo vienetui, arba masės perdavimo vieneto aukštį (*MPVA*), kurio matavimo vienetas *m*. Tada, naudojant *MPVS* ir *MPVA*, darbinis aparato aukštis *H* apskaičiuojamas pagal tokias lygtis:

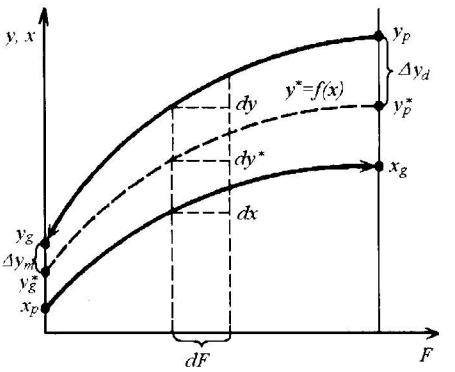
$$H = h_{0y} \cdot n_{0y} \quad \text{ir} \quad H = h_{0x} \cdot n_{0x}. \tag{16.48}$$

Šiuo metodu pagal empirines priklausomybes apskaičiuojama h_{0y} ir h_{0x}, o vėliau – *H*, aplenkiant fazių sąlyčio paviršiaus skaičiavimus.

Bet kurios pusiausviros priklausomybės, pašalinus Δy_{vid} *ir* Δx_{vid}, *MPVS* galima pateikti bendresne forma. Tariame, kad procesas yra nuostovusis ir vyksta esant priešsroviniam srautų judėjimui. Srautų struktūra aprašoma *IIM*, kai $x < x^*$ (t. y. procesas vyksta iš dujinės fazės *V* į skystąją fazę *L*).

Fazių sąlyčio paviršiaus elemento *dF* (16.7 pav.) medžiagos kiekis *dM*, perėjęs iš dujinės fazės *V* į skystąją fazę *L*,

$$dM = -G \cdot dy = \beta_y \cdot \left(y - y_p\right) \cdot dF.$$



16.7 pav. Vidutinės masės perdavimo proceso varos jėgos grafinis vaizdas

Suintegravę pagal visą paviršių intervale nuo *0* iki *F* arba nuo y_p iki y_g ir pakeitę ženklus ir kintamuosius, gausime:

$$\int_{y_g}^{y_p} \frac{dy}{(y - y_{rib})} = \beta_y \cdot F/G = n_y \; ; \tag{16.49}$$

čia n_y – *MPVS* dujų fazėje, nes $dy/(y - y_{rib})$ atitinka medžiagos darbinės koncentracijos pasikeitimo ir varos jėgos santykį; santrumpa *rib* reiškia atitinkamą parametrą fazes skiriančiame paviršiuje.

Analogiškai fazei *L*

$$\int_{x_p}^{x_g} dx/(x_{rib} - x) = \beta_x \cdot F/L = n_x \; . \tag{16.50}$$

Tačiau dydį *dM* galima išreikšti naudojantis masės perdavimo lygtimi:

$$dM = -V \cdot dy = K_y \cdot (y - y^*) \cdot dF \; .$$

Perskyrę kintamuosius ir suintegravę, gausime:

$$\int_{y_g}^{y_p} dy/(y - y_{rib}) = \int (K_y \cdot F/V) \cdot dF = (K_y \cdot F/M) \cdot (y_p - y_g); \tag{16.51}$$

$$M = K_y \cdot F \cdot \frac{y_p - y_g}{\int_{y_g}^{y_p} dy/(y - y^*)} \; . \tag{16.51a}$$

Palyginę (16.51a) lygtį su (16.36) lygtimi, gauname:

$$\Delta y_{vid} = \frac{y_p - y_g}{\int_{y_g}^{y_p} dy/(y - y^*)} , \tag{16.52}$$

t. y. gauta lygtis, pagal kurią apskaičiuojama vidutinė proceso varos jėga koncentracijos dujinėje fazėje *V* vienetais, esant bet kokiai pusiausvyros lygčiai. Analogiškai skystajai fazei *L*

$$\Delta x_{vid} = \frac{x_g - x_p}{\int_{x_p}^{x_g} dx/(x^* - x)} , \tag{16.53}$$

$$\text{bet } \int_{y_g}^{y_p} dy/\left(y-y^*\right)=n_{0y} \text{ ir } \int_{x_p}^{x_g} dx/\left(x^*-x\right)=n_{0x}. \tag{16.54}$$

Tada iš masės perdavimo vienetų skaičiaus ir masės perdavimo koeficiento tarpusavio priklausomybės ((16.51a) ir (16.54) lygtys) galima gauti tokią priklausomybę:

$$\begin{aligned}&\int_{y_g}^{y_p} dy/\left(y-y^*\right)=n_{0y}=\left(K_y\cdot F/M\right)\cdot\left(y_p-y_g\right)= \\ &=K_y\cdot F\cdot\left(y_p-y_g\right)/\left[V\cdot\left(y_p-y_g\right)\right]=K_y\cdot F/V.\end{aligned} \tag{16.55}$$

Iš šios lygties išreiškiamas dydis $1/n_{0y}$:

$$1/n_{0y}=\left(1/K_y\right)\cdot V/F=\left[\left(1/\beta_y\right)+\left(m/\beta_x\right)\right]\cdot V/F\,. \tag{16.55a}$$

Naudodamiesi (15.40) ir (15.50) lygtimis, gausime:

$$1/n_{0y}=\left(1/n_y\right)+m\cdot V/\left(n_x\cdot L\right)=\left(1/n_y\right)+1/\left(n_x\cdot A\right); \tag{16.56}$$

čia $A=L/\left(m\cdot V\right)$ – masės perdavimo proceso veiksnys.

Atlikę panašius pertvarkymus, gauname išraišką skystajai fazei:

$$1/n_{0x}=\left(1/n_x\right)+A/n_y\,. \tag{16.57}$$

Iš šių lygčių gaunamas ryšys tarp n_{0y} ir n_{0x}:

$$n_{0x}=n_{0y}/A\,. \tag{16.58}$$

Iš (16.47), (16.49) ir (16.50) lygčių pagal analogiją su (16.35) ir (16.38) lygtimis gauname išraiškas dydžiams h_{0y} ir h_{0x} apskaičiuoti:

$$h_{0y}=h_y+h_x/A \tag{16.59}$$

ir $$h_{0x}=h_x+A\cdot h_y\,; \tag{16.60}$$

iš čia nustatomas ryšys tarp h_{0y} ir h_{0x}:

$$h_{0x}=A\cdot h_{0y}\,. \tag{16.61}$$

Masės pernašos vieneto aukštis yra aparato su vientisu fazių sąlyčio paviršiumi kinetinė charakteristika. Bendresnė charakteristika, nesvarbu, ar aparatai yra su vientisu, ar su pakopiniu fazių sąlyčio paviršiumi, yra masės pernašos vieneto tūris v_{0y}, t. y. masės mainų aparato darbinis tūris, pagal perskyrimo efektyvumą atitinkantis vieną pernašos vienetą.

Į (16.55) lygtį vietoj F įrašę jo vertę, apskaičiuotą pagal lygtį $F = a \cdot S \cdot H$, gauname:

$$n_{o_y} = K_y \cdot S \cdot H \cdot a/V = K_{yV} \cdot S \cdot H/V = K_{yV} \cdot V_a/V . \qquad (16.62)$$

Iš (16.62) lygties

$$V_a = n_{0y} \cdot V/K_{yV} = n_{oy} \cdot v_{oy}; \qquad (16.62a)$$

iš čia

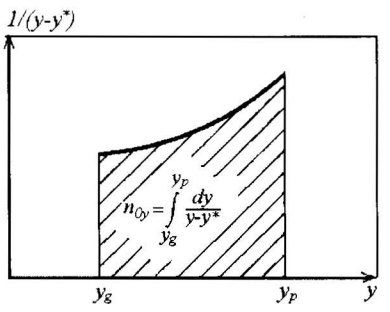
$$v_{0y} = V/K_{yV} = S \cdot h_{0y} . \qquad (16.63)$$

Priklausomybė tarp v_{0y}, v_{0x}, v_y, v_x gali būti išreikšta (16.59)...(16.61) lygtimis, jose h_{0y}, h_{0x}, h_y ir h_x pakeičiant atitinkamai į v_{0y}, v_{0x}, v_y ir v_x.

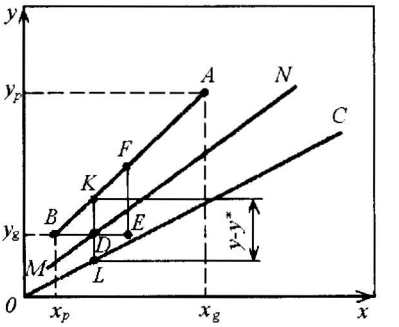
Visi masės pernašos kinetiką apibūdinantys dydžiai – masės perdavimo koeficientas, tūrinis masės perdavimo koeficientas, masės perdavimo vieneto aukštis ir tūris yra tarpusavyje susiję. Todėl visi masės mainų aparatų aukščio skaičiavimo metodai yra lygiaverčiai, tik naudojamos skirtingos matematinės išraiškos.

Masės pernašos vienetų skaičiaus nustatymas. (16.54) lygtis gali būti sprendžiama analitiškai arba integruojama grafiniu arba analitiniu metodu.

Dažniausiai masės pernašos vienetų skaičius nustatomas grafiškai integruojant. Pasirinkus keletą y verčių, esančių tarp y_{pr} ir y_g, brėžiama priklausomybės $1/(y - y^*) = f(y)$ kreivė (16.8 pav.) ir apskaičiuojamas užbrūkšniuotas plotas. Padauginę šį plotą iš diagramos mastelio, gausime (16.54) lygties integralo vertę. Tokiu pat būdu pagal (16.52) arba (16.53) lygtį apskaičiuojama proceso varos jėga.



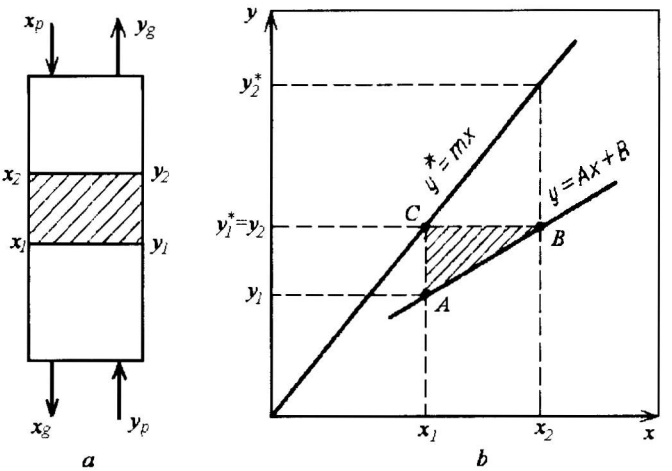
16.8 pav. *MPVS* nustatymas grafiniu integravimu



16.9 pav. Grafinis *MPVS* nustatymas

Pernašos vienetų skaičius gali būti nustatytas paprastu grafiniu metodu, sudarytu *y–x* diagramoje (16.9 pav.). Koordinačių sistemoje *y–x* nubrėžus pusiausvyros liniją *OC* ir darbo liniją *AB*, brėžiama linija *MN*, ordinatės atkarpas tarp darbo linijos *A*B ir pusiausvyros linijos *OC* dalijanti pusiau. Po to iš taško *B* brėžiama horizontali linija, lygi dvigubai atkarpai *BD*, o iš taško *E* brėžiama vertikalė iki susikirtimo su darbo linija taške *F*. Iš paveikslo matyti, kad $EF = 2 \cdot KD = KL$. Tačiau atkarpa *KL* lygi proceso vidutinei varos jėgai $\left(y - y^*\right)$ atkarpoje *BF*, taigi atkarpa *EF* vaizduoja koncentracijos kitimą, atitinkantį vieną masės pernašos vienetą. Pernašos vienetas vaizduojamas laipteliu *BEF*. Laipteliai braižomi iki taško *A*. Laiptelių skaičius tarp taškų *B* ir *A* lygus *MPVS*.

Koncentracijos kitimo teorinė pakopa arba laipsnis (teorinė lėkštė). Nagrinėsime atvejį, kai medžiaga iš skysčio *L* pernešama į dujas *V* (t. y. $y < y^*$). Parenkamas toks aparato elementarusis tūris (16.10 pav., *a*), iš kurio ištekančiame sraute paskirstomosios medžiagos koncentracija y_2 lygi pusiausvirajai koncentracijai į elementarųjį tūrį įtekančiame sraute, t. y. $y_2 = y_1^*$, – taškas *B* (16.10 pav., *b*). Atitinkamai dujų fazės sudėties pasikeitimas elementariame tūryje vaizduojamas atkarpa *AB* (16.10 pav., *b*).



16.10 pav. Koncentracijos kitimo priešsroviniame aparate schema (*a*) ir jo vaizdavimas *y–x* diagramoje (*b*)

Šiame aparato tūryje įvyksta visiškas (teorinis) paskirstomosios medžiagos pasikeitimas tarp fazių. Toks koncentracijos pasikeitimas vadinamas teorine koncentracijos pasikeitimo pakopa, arba teorine lėkšte. Brėžiant tokias

pakopas tarp darbo ir pusiausvyros linijų (16.10 pav., *b*) pasirinktame darbo koncentracijų intervale, nustatomas bendras proceso pakopų skaičius n_t (teorinių lėkščių skaičius – *TLS* arba teorinių pakopų skaičius – *TPS*). Kai bendras aparato su pakopiniu fazių kontaktu aukštis H yra nustatomas naudojant teorinių pakopų skaičių, apskaičiuojamas tikrasis lėkščių skaičius n_r:

$$n_r = n_t / \eta ; \qquad (16.64)$$

čia η – atskiros lėkštės naudingumo koeficientas, lygus teorinio lėkščių skaičiaus santykiui su realiu lėkščių skaičiumi.

Kolonos naudingumo koeficientas įvertina masės pernašos greitį ant realių lėkščių, kuriose nepasiekiama pusiausvyra. Naudingumo koeficiento η vertė priklauso nuo daugelio veiksnių (fazių srautų greičių, jų fizikinių savybių, srautų struktūros ir kt.).

Nustačius realų lėkščių skaičių n_r, aparatų su pakopiniu arba diskretiniu fazių sąlyčio paviršiumi darbo dalies aukštis H_d apskaičiuojamas pagal tokią lygtį:

$$H_d = (n_r - 1) \cdot h_l ; \qquad (16.65)$$

čia h_l – atstumas tarp pakopų arba lėkščių.

Masės mainų aparatų su tolydžiuoju arba analoginiu fazių sąlyčio paviršiumi aukštį H taip pat galima apskaičiuoti naudojant *TLS* arba *TPS*. Tada H apskaičiuojamas pagal tokią lygtį:

$$H = n_t \cdot h_e ; \qquad (16.66)$$

čia h_e – aparato aukštis, kuris yra ekvivalentiškas vienos teorinės koncentracijos pasikeitimo pakopos (*ETPA*) arba teorinės lėkštės (*ETLA*) aukščiui.

ETPA arba *ETLA* vertės apskaičiuojamos pagal empirines lygtis. Dydžio h_e vertė priklauso nuo pusiausvyros linijos pasvirimo kampo tangento m. Kai pusiausvyros linija yra kreivė, tada *ETPA* vertė yra kintama aparato aukštyje, o tai didžiausias skaičiavimo metodo trūkumas, kai masės mainų aparatų skaičiavimams naudojama h_e.

Tarp masės perdavimo koeficiento K_y, masės pernašos vieneto aukščio (*MPVA*) ir ekvivalentinės teorinės pakopos aukščio h_e yra tam tikras ryšys. Teorinėje pakopoje skystosios fazės L sudėtis kinta nuo x_1 iki x_2 (žr. 16.10 pav., *b*), o dujų arba garų fazės V – nuo y_2 iki y_1. Tokioje teorinėje pakopoje arba lėkštėje iš vienos fazės į kitą perėjęs paskirstomosios medžiagos kiekis apskaičiuojamas pagal lygtį

$$M_t = V \cdot (y_2 - y_1) = V \cdot \Delta y .$$

Šis medžiagos kiekis gali būti išreikštas ir tokia lygtimi:

$$M_t = K_y \cdot a \cdot S \cdot h_e \cdot \Delta y_{vid.t}; \qquad (16.67)$$

čia $\Delta y_{vid.t} = (\Delta y_{max.t} - \Delta y_{min.t}) / ln(\Delta y_{max.t} / \Delta y_{min.t})$ – vidutinis koncentracijų skirtumas teorinėje lėkštėje.

Laikant, kad pusiausvyros linija yra tiesė,

$$\Delta y_{min.t} = y_2^* - y_2 = m \cdot (x_2 - x_1).$$

Jeigu fazių srautai teorinėje lėkštėje mažai keičiasi, tai jų debitai $L = const$, $V = const$ ir

$$\Delta y_{mav.t} = y_1^* - y_1 = (x_2 - x_1) \cdot L/V;$$

tada $\Delta y_{min.t} = \Delta y_{max.t} \cdot m \cdot V/L = (1/A) \cdot \Delta y_{max.t}$,

o $\Delta y_{max.t} \cdot [(1/A) - 1] / ln(1/A)$;

čia $A = L/(m \cdot V)$ – masės perdavimo veiksnys, apibūdinantis pusiausvyros linijos pasvirimo kampo tangento m santykį su darbo linijos pasvirimo kampo tangentu L/V.

Dydis A yra masės pernašos varos jėgos matas; jis gali būti didesnis arba mažesnis už vienetą.

Jeigu pastarąją išraišką įrašysime į (16.67) lygtį, tai gausime tokią lygtį:

$$M_t = V \cdot \Delta y_{max.t} = K_y \cdot a \cdot S \cdot h_e \cdot \Delta y_{max.t} \cdot [(1/A) - 1] / ln(1/A);$$

iš čia $h_e = [V/(K_y \cdot a \cdot S)] \cdot ln(1/A) \cdot [(1/A) - 1]$. (16.68)

Tada, atsižvelgdami į (16.47) ir (16.68) lygtis, gausime:

$$h_e = MPVA \cdot ln(1/A) \cdot [(1/A) - 1]. \qquad (16.69)$$

Kai pusiausvyros linija yra kreivė, ryšys tarp nagrinėjamųjų dydžių yra sudėtingesnis ir nagrinėjamas specialioje literatūroje.

Aparatų su pakopomis arba diskretiškai kontaktuojančiomis fazėmis pagrindiniai aukščio skaičiavimo metodai. Be aparatų aukščio skaičiavimo pagal teorinių lėkščių skaičių ir atstumą tarp pakopų h_t ((16.65) lygtis), yra dar keletas šių aparatų skaičiavimo metodų.

Skaičiavimas pagal masės perdavimo lygtis. Realių pakopų arba lėkščių skaičiui nustatyti galima panaudoti masės perdavimo lygtį:

$$M = K_y \cdot F \cdot \Delta y_{vid}.$$

Tačiau masės perdavimo koeficientas K_y yra apskaičiuotas masės pernašos paviršiaus ploto F, kurį sunku nustatyti, vienetui, todėl šį koeficientą siūloma perskaičiuoti lėkštės paviršiaus ploto S vienetui. Tuomet

$$F = a \cdot V_p = a \cdot h_p \cdot S;$$

čia V_p ir h_p – skysčio ir dujų arba garų ir putų sluoksnio ant lėkštės atitinkamai tūris ir aukštis; a – savitasis fazių kontakto paviršiaus plotas putų sluoksnyje ant lėkštės ($a = 6 \cdot \varepsilon / d_b$ – savitasis fazių sąlyčio paviršiaus plotas; ε – putų užpildymo dujomis laipsnis; d_b – vidutinis burbuliuko skersmuo).

Tada $$M = K_y \cdot a \cdot h_p \cdot S \cdot \Delta y_{vid} = K_{yS} \cdot \Delta y_{vid};$$ (16.70)

čia $K_{yS} = K_y \cdot a \cdot h_p$ – masės pernašos koeficientas, tenkantis lėkštės paviršiaus ploto vienetui; S – visų aparato lėkščių suminis darbo paviršius.

Koeficientas apskaičiuojamas pagal tokią lygtį:

$$K_{yS} = 1/\left[\left(1/\beta_{yS}\right) + \left(m/\beta_{xS}\right)\right];$$ (16.71)

čia β_{yS} ir β_{xS} – masės atidavimo koeficientai, apskaičiuoti lėkštės ploto vienetui.

Realių pakopų arba lėkščių skaičius nustatomas iš tokios lygties:

$$n_r = S/S_t;$$ (16.72)

čia $S_t = Q/W$ – vienos lėkštės darbo paviršius; W – vientisosios fazės judėjimo greitis, apskaičiuotas lėkštės darbo ploto vienetui (1 m^2).

Naudojantis (16.65) lygtimi galima nustatyti aparato lėkštinės dalies aukštį H_t.

Skaičiavimas pagal masės pernašos vienetų skaičių. Medžiagos kiekis M_t ant vienos lėkštės, pernešamas iš vienos fazės į kitą, apskaičiuojamas pagal (16.70) masės pernašos lygtį :

$$M_t = K_{yS} \cdot \Delta y_{vid}.$$

Tas pats medžiagos kiekis gali būti apskaičiuotas pagal vienos lėkštės medžiagų balanso lygtį (pvz., pagal dujų fazę V):

$$M_t = V \cdot \left(y_p - y_g\right);$$

čia y_p – koncentracija, srautui įtekant į lėkštę; y_g – koncentracija, srautui ištekant iš lėkštės.

Tada $$K_{yS} \cdot S \cdot \Delta y_{vid} = V \cdot \left(y_p - y_g\right);$$

iš čia $$K_{yS} \cdot S/V = \left(y_p - y_g\right)/\Delta y_{vid} = n_{0\,yS}.$$ (16.73)

Skystajai fazei L turime analogišką lygtį:

$$K_{xS} \cdot S/L = \left(x_g - x_p\right)/\Delta x_{vid} = n_{0\,xS}\,, \tag{16.74}$$

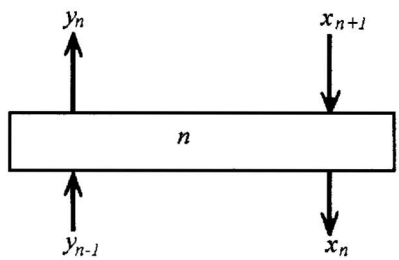
arba, naudodamiesi (16.56) ir (16.57) lygtimis, gauname:

$$1/n_{0\,yS} = 1/n_{yS} + 1/\left(n_{xS} \cdot A\right) \tag{16.75}$$

ir $1/n_{0\,xS} = 1/n_{xS} + A/n_{yS}$; (16.76)

čia $n_{yS} = \beta_{yS} \cdot S/V$ ir $n_{xS} = \beta_{xS} \cdot S/L$ – daliniai masės pernašos vienetų skaičiai, nustatyti lėkštės darbo paviršiaus ploto vienetui.

Pagal (16.73) arba (16.74) lygtį apskaičiavę viso proceso *MPVS* ir padaliję jį iš vienos lėkštės *MPVS*, gausime realų lėkščių skaičių n_r, o po to pagal (16.65) apskaičiuosime aparato lėkštinės dalies aukštį.



16.11 pav. Koncentracijų pasikeitimas vienoje lėkštėje, kai fazės juda prieš srovę

Lėkštės arba pakopos efektyvumas pagal Merfrį. Šį efektyvumą, arba Merfrio naudingumo koeficientą, išreiškia tiriamosios fazės koncentracijos pokyčio pakopoje arba lėkštėje santykis su proceso varos jėga, fazei įtekant į pakopą arba lėkštę, tos pačios fazės koncentracijos vienetais ir žymimas E_y ir E_x. n-osios lėkštės (16.11 pav.) fazei V, kai medžiaga iš skystosios fazės pereina į dujinę, gauname:

- pagal dujinę fazę:

$$E_y = \left(y_n - y_{n-1}\right)/\left(y^*_{(x_n)} - y_{n-1}\right); \tag{16.77}$$

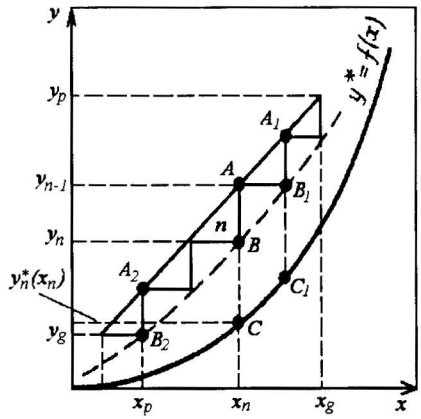
- pagal skystąją fazę:

$$E_x = \left(x_n - x_{n-1}\right)/\left(x_{n+1} - x^*_{(y_n)}\right). \tag{16.78}$$

Merfrio naudingumo koeficiento vertė priklauso nuo masės pernašos greičio, t. y. nuo β_y ir β_x, n_y ir n_x, fazių tarpusavio judėjimo krypčių, fazių srautų struktūros, fazių sąlyčio paviršiaus ir kitų veiksnių.

Naudojant Merfrio naudingumo koeficientą, realių lėkščių skaičių galima nustatyti grafiniu (vadinamuoju kinetinės linijos) metodu. Šis rodiklis bet kuriai (pvz., n-ajai, 16.12 pav.) pakopai išreiškiamas lygtimi

$$E_y = (y_{n-1} - y_n)/(y_{n-1} - y_n^*). \qquad (16.77a)$$



16.12 pav. Realių pakopų (lėkščių) skaičiaus nustatymas grafiniu metodu, kai masė pernešama iš dujinės fazės į skystąją

Iš čia išplaukia, kad Merfrio naudingumo koeficientas parodo tikro koncentracijos pasikeitimo n-ojoje lėkštėje ($y_{n-1} - y_n$) dalį, apibūdinamą atkarpa $\overline{AB}$, nuo maksimaliai galimo šioje lėkštėje ($y_{n-1} - y_n^*(x_n)$), apibūdinamo atkarpa $\overline{AC}$). Taigi (16.77a) lygtis užrašoma taip:

$$E_y = (y_{n-1} - y_n)/(y_{n-1} - y_n^*) = \overline{AB}/\overline{AC}, \qquad (16.79)$$

arba $\overline{AB} = \overline{AC} \cdot E_y$. (16.79a)

Tada darbo linijoje laisvai pasirinkus taškus A, A_1, A_2 ir t. t., per juos nuleidus statmenis į x ašį iki pusiausvyros linijos, gaunamos atkarpos $\overline{AC}$, $\overline{A_1C_1}$, $\overline{A_2C_2}$ ir t. t. Naudojantis (16.79a) lygtimi apskaičiuojami atkarpų $\overline{AB}$, $\overline{A_1B_1}$, $\overline{A_2B_2}$ ir t. t. ilgiai. Per taškus B, B_1, B_2 ir t. t. brėžiama kinetinė kreivė. Pasirinktame koncentracijos kitimo intervale tarp kinetinės ir darbo linijų braižomos pakopos. Pakopų skaičius prilyginamas tiriamajam procesui atlikti reikalingam realių lėkščių skaičiui.

Brėžiant kinetinę kreivę sudėtingiausia yra nustatyti Merfrio naudingumo koeficientą, kuris priklauso nuo daugelio veiksnių. Panagrinėsime dažnai apa-

ratuose su pakopiniu fazių sąlyčio paviršiumi pasitaikantį srautų struktūros, kuri turi įtakos E_y ir E_x vertei, atvejį.

1. Skystis ir dujos lėkštėje visiškai arba idealiai susimaišo. Šiuo atveju ant kiekvienos lėkštės fazių koncentracija yra pastovi ir lygi galutinei, varos jėga n-ojoje lėkštėje lygi $\left(y_n - y_n^*(x_n)\right)$. Tada

$$\left(y_{n-1} - y_n\right)/\left(y_n - y_n^*(x_n)\right) = K_y \cdot F/V = n_{0y} .$$

Prie šio reiškinio vardiklio pridėsime ir iš jo atimsime dydį y_{n-1}:

$$n_{0y} = \left(y_{n-1} - y_n\right)/\left(y_n - y_n^*(x_n) + y_{n-1} - y_{n-1}\right).$$

Padaliję šio reiškinio dešiniosios pusės skaitiklį ir vardiklį iš dydžio $\left(y_{n-1} - y_n\right)$, gausime:

$$\frac{1}{\left[\left(y_{n-1} - y_n^*(x_n)\right)/\left(y_{n-1} - y_n\right)\right] - \left[\left(y_{n-1} - y_n\right)/\left(y_{n-1} - y_n\right)\right]} =$$

$$= \frac{1}{\left(1/E_y\right) - 1} = n_{0y},$$

arba $$E_y = n_{0y}/\left(1 + n_{0y}\right), \qquad (16.80)$$

t. y. esant idealiam arba visiškam fazių susimaišymui, $E_y < 1$.

Skystajai fazei L pagal analogiją gausime:

$$E_x = n_{0x}/\left(1 + n_{0x}\right). \qquad (16.80a)$$

2. Skystis ant lėkštės visiškai susimaišo, o dujų fazė, pereidama per putų sluoksnį virš lėkštės, sluoksnio aukštyje nesimaišo. Paprastai tokiu atveju laikoma, kad ant lėkštės koncentracijos fazėse kinta nedaug ir į pusiausvyros linijos kreivumą galima nekreipti dėmesio.

Tada n-ajai pakopai (lėkštei)

$$\Delta y_{vid} = \frac{\left(y_{n-1} - y^*_{n(x_n)}\right) - \left(y_n - y^*_{n(x_n)}\right)}{ln\left[\left(y_{n-1} - y^*_{n(x_n)}\right)/\left(y_n - y^*_{n(x_n)}\right)\right]} =$$

$$= \frac{\Delta y_{n-1} - \Delta y_n}{ln\left(\Delta y_{n-1}/\Delta y_n\right)}; \qquad (16.81)$$

$$n_{0y} = \left(y_{n-1} - y_n\right)/\Delta y_{vid} . \qquad (16.82)$$

Palyginus (16.81) ir (16.82) lygtis, gaunama:

$$n_{0y} = ln\left[\left(y_{n-1} - y^*_{n(x_n)}\right)/\left(y_{n-1} - y^*_{n(x_n)}\right)\right].$$

Šios lygties vardiklyje pridedamas ir atimamas reiškinys y_{n-1}:

$$n_{0y} = ln\frac{y_{n-1} - y^*_{n(x_n)}}{\left(y_n - y_{n-1}\right) + \left(y_{n-1} - y^*_{n(x_n)}\right)}. \qquad (16.83)$$

Toliau (16.83) lygties skaitiklis ir vardiklis padalijami iš skaitiklio:

$$n_{0y} = \ln\frac{1}{1 - E_y}; \qquad (16.84)$$

iš čia $E_y = 1 - exp\left(-n_{0y}\right)$. (16.85)

Pagal (16.85) lygtį pakankamai tiksliai apskaičiuojamas lėkščių skaičius aparatuose su ištisinio pralaidumo lėkštėmis (žr. 17.5.3 sk.). Kaip nustatomas kito tipo lėkščių skaičius, rašoma 17 dalyje, panagrinėjus lėkštinių aparatų konstrukciją ir veikimo principą.

Čia reikia pasakyti, kad, kai išilgai lėkštės skystis nevisiškai susimaišo, koncentracija visame lėkštės ilgyje skiriasi nuo galinės koncentracijos. Todėl E_y vertė gali būti gaunama didesnė už vienetą.

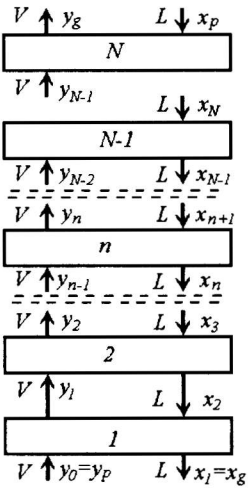
Lėkštinių aparatų skiriamasis bruožas, palyginti su tolydaus fazių kontakto aparatais, yra fazių kontakto tarp lėkščių išreiškimas. Šiuo atveju darbo linija nėra vientisa. Tai yra geometrinė vieta diskretinių taškų, kurių kiekviename darbo koncentracijos fazėse paimtos atskiruose tarp pakopų išdėstytuose skerspjūviuose. Todėl pakopų skaičius skaičiuojamas iš apačios į viršų nuo lėkštės prie lėkštės, iki ant viršutinės (paskutinės) pakopos pasiekiamos pasirinktos koncentracijos y_g ir x_p (16.13 pav.). Skaičiavimams naudojamos medžiagų balanso ir medžiagos perdavimo lygtys kiekvienai lėkštei. Pavyzdžiui, pirmajai lėkštei (žr. 16.13 pav.)

$$V \cdot \left(y_p - y_1\right) = L \cdot \left(x_g - x_2\right) \qquad (16.86)$$

ir $V \cdot \left(y_p - y_1\right) = K_y \cdot F \cdot \Delta y_{vid}$. (16.87)

Šiuo atveju pusiausvyros linija $y^* = f(x)$ kiekvienai pakopai (lėkštei) laikoma tiese, kadangi koncentracija ant kiekvienos lėkštės pasikeičia mažai. Tada pirmosios pakopos varos jėga apskaičiuojama pagal lygtį

$$\Delta y_{vid\,1} = \frac{\left(y_p - y^*_{(x_g)}\right) - \left(y_1 - y^*_{(x_2)}\right)}{ln\left[\left(y_p - y^*_{(k_g)}\right)/\left(y_1 - y^*_{(x_2)}\right)\right]}. \qquad (16.88)$$



16.13 pav. Lėkščių (pakopų) skaičiaus nustatymas *nuo lėkštės prie lėkštės* metodu

Kitų pakopų varos jėga apskaičiuojama analogiškai.

(16.86) ir (16.87) lygtyse yra du nežinomi dydžiai: y_1 ir x_2 $\left[y^*_{(x_2)} = f(x_2)\right]$, kuriuos galima nustatyti, įvertinus (16.88) lygtį. Nustatytų y_1 ir x_2 verčių pagrindu nustatoma antrajai pakopai (lėkštei) y_2 ir x_3 ir t. t., kol bus gautos pasirinktos koncentracijos y ir x_p. Tai leidžia nustatyti tiriamajam procesui atlikti būtiną pakopų (lėkščių) skaičių.

Skaičiavimui palengvinti vietoj (16.87) ir (16.88) lygčių galima naudoti (16.86) lygtį prie jos pridėjus efektyvumo arba Merfrio naudingumo koeficiento lygtį. Pavyzdžiui, pirmajai lėkštei

$$E_y = (y_p - y_1)/(y_p - y^*_{(x_g)}) = f(n_{0y}, A); \qquad (16.89)$$

čia

$$n_{oy} = K_{yS} \cdot S/V, \qquad A = L/(m \cdot V). \qquad (16.89a)$$

(16.89) lygties dešiniosios pusės funkcinė išraiška taip pat priklauso nuo srautų ant lėkštės judėjimo tarpusavio krypties ir jų struktūros.

Skaičiavimas *nuo lėkštės prie lėkštės* metodu, naudojant Merfrio naudingumo koeficientą, atliekamas taip: pagal (16.89) lygtį apskaičiuojama y_1, o vėliau pagal (16.86) lygtį apskaičiuojamas dydis x_2. Po to galima nustatyti y_2 ir x_3 vertes antrajai lėkštei ir t. t.

17 DALIS

ABSORBCIJA

Absorbcija yra toks procesas, kai dujas arba garus (absorbtyvą) sugeria skysčiai (absorbentai). Kai tarp absorbtyvo ir absorbento nevyksta cheminė reakcija, tokia *absorbcija* vadinama fizikine. Nesugerta dujų dalis vadinama inertinėmis dujomis. Absorbcija, kurios metu tarp absorbento ir absorbtyvo vyksta cheminė reakcija, vadinama chemosorbcija. Technologiniuose procesuose taikomi abu absorbcijos būdai. Fizikinė absorbcija, arba tiesiog absorbcija, yra selektyvusis ir grįžtamasis procesas. Jis taikytinas, kai dujų ir garų mišinius reikia išskirstyti į komponentus. Po absorbcijos atliekama desorbcija – iš skysčio išskiriami vienas arba keli iš dujų arba garų mišinio absorbuoti komponentai. Po fizikinės absorbcijos dujų desorbcija atliekama šildant absorbentą arba sumažinant slėgį virš absorbento ir šitaip absorbtyvą išgarinant į inertinių dujų arba vandens garų srautą. Po chemosorbcijos naudotasis absorbentas regeneruojamas cheminiais metodais arba kaitinant.

Derinant absorbciją ir desorbciją, galima kelis kartus naudoti absorbentą ir iš dujų mišinio išskirti grynus dujų komponentus. Pramonėje absorbcija naudojama:

1) gauti produktams (pvz., SO_3 absorbcija, gaminant sieros rūgštį ir kt.); tokiais atvejais vyksta tik absorbcija be desorbcijos;

2) vertingiems komponentams išskirti iš dujų mišinių (pvz., benzenui išskirti iš koksavimo dujų, acetilenui absorbuoti iš krekingo, gamtinių arba pirolizės dujų ir t. t.); šiuo atveju absorbcija derinama su desorbcija;

3) kenksmingoms priemaišoms šalinti iš į aplinką išmetamų dujų (pvz., SO_2 šalinti iš kūryklų dujų arba fluoro junginiams šalinti iš trąšų gamyboje susidarančių dujų ir t. t.). Absorbcija kenksmingos priemaišos gali būti šalinamos ir iš technologiniuose procesuose naudojamų dujų (pvz., iš koksavimo ir naftos perdirbimo dujų šalinamas H_2S, iš amoniako sintezėje naudojamo vandenilio ir azoto mišinio šalinami CO_2 ir CO ir t. t.). Šiais atvejais iš dujų mišinių išskiriami komponentai dažniausiai panaudojami tolesnei gamybai, todėl po absorbcijos būtinai atliekama desorbcija;

4) dujoms džiovinti, kai iš dujų absorbuojami vandens garai.

Aparatai, kuriuose vykdoma absorbcija, vadinami absorberiais.

17.1. Dujų ir skysčio sistemos fazių pusiausvyra

Dujų ir skysčio sąveikos metu sistema dažniausiai būna sudaryta iš trijų komponentų (paskirstomosios ir dviejų paskirstančiųjų medžiagų) ir dviejų fazių – skysčio ir dujų. Jei sistema sudaryta iš trijų komponentų ir dviejų fazių, tai pagal fazių taisyklę ji turi tris laisvės laipsnius ($C = K - F + 2 = 3 - 2 + 2 = 3$).

Absorbcijos atveju kintamieji gali būti keturi dydžiai: temperatūra, slėgis ir vieno iš komponentų koncentracija dujose ir skystyje. Todėl, kai sistema yra pusiausvira ir proceso temperatūra bei bendras slėgis yra pastovūs, tarp komponento koncentracijų dujose ir skystyje arba tarp komponento dalinio slėgio ir jo koncentracijos skystyje egzistuoja pusiausvyrą nusakanti priklausomybė, vadinama Henrio dėsniu: *skystyje tirpių dujų* dalinis slėgis virš tirpalo yra tiesiog proporcingas tame tirpale ištirpusių šių dujų koncentracijai:

$$p_A^* = E \cdot x_A, \tag{17.1}$$

arba absorbuojamo dujų komponento tirpumas, esant pastoviai temperatūrai, yra proporcingas jų daliniam slėgiui virš skysčio:

$$x_A^* = (1/E) \cdot p_A; \tag{17.1a}$$

čia E – proporcingumo koeficientas, vadinamas Henrio konstanta, arba Henrio koeficientu; p_A^* – absorbuojamų dujų, pusiausvirų su skysčiu, kuriame absorbuojamų dujų koncentracija x_A, molio dalimis, dalinis slėgis; x_A^* – dujų, pusiausvirų su dujomis, kuriose absorbuojamo komponento dalinis slėgis p_A, koncentracija skystyje, molio dalimis.

Kuo geriau dujos tirpsta absorbente, tuo mažesnės absorbento sąnaudos. Todėl, parenkant absorbentą, absorbuojamų dujų tirpumas jame laikomas svarbiausia jo savybe.

Henrio konstantos priklausomybė nuo temperatūros išreiškiama tokia lygtimi:

$$\ln E = -(q/(R \cdot T)) + c; \tag{17.2}$$

čia q – diferencinė dujų tirpumo šiluma; c – nuo dujų ir absorbento kilmės priklausantis koeficientas.

Idealiuose tirpaluose sąveikos jėgos tarp to paties komponento molekulių lygios sąveikos jėgoms tarp skirtingų komponentų molekulių. Todėl vieno ar kito komponento lakumas iš tirpalo į dujinę fazę nepriklauso nuo kitų komponentų buvimo tirpale ir nusakomas komponento kiekiu tirpale.

Idealių tirpalų p–x diagramoje (17.1 pav.) priklausomybė tarp pusiausviros koncentracijos ir slėgio vaizduojama tiese, kurios pasvirimo į abscisę

kampo tangentas lygus E. Didėjant temperatūrai, E didėja, o dujų tirpumas skystyje mažėja (17.1 pav.).

Esant bendram slėgiui dujose P ir absorbuojamo komponento A koncentracijai, molio dalimis, y_A, jo dalinis slėgis p_A išreiškiamas Daltono dėsniu: dalinis komponento slėgis dujų mišinyje proporcingas bendram mišinio slėgiui ir komponento koncentracijai jame, molio dalimis:

$$p_A = P \cdot y_A . \tag{17.3}$$

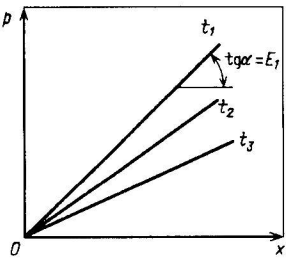
Įvertinę (17.1) lygtį, gausime:

$$y_A^* = (E/P) \cdot x_A . \tag{17.4}$$

Tada Henrio dėsnį galima užrašyti taip:

$$y_A^* = A_p \cdot x_A ; \tag{17.5}$$

čia $A_p = E/P$ – pasiskirstymo koeficientas, arba fazių pusiausvyros konstanta.



17.1 pav. Dujų tirpumas skystyje, esant įvairioms temperatūroms ($t_1 > t_2 > t_3$)

Absorbciją, kaip ir kitus masės mainų procesus, patogu nagrinėti naudojantis dujų ir skysčio pusiausvyrą vaizduojančia diagrama (Y–X).

(17.5) arba (17.4) lygtys išreiškia priklausomybę tarp absorbuojamo komponento koncentracijos dujų mišinyje ir skystyje, pusiausvirame su šiuo dujų mišiniu. Ši priklausomybė grafiškai vaizduojama pusiausvyros linija, nubrėžta per koordinačių pradžią ir su abscise sudarančia kampą α, kurio tangentas lygus pasiskirstymo koeficientui A_p. A_p vertė mažėja, mažėjant sistemos temperatūrai ir didėjant slėgiui. Todėl dujų tirpumas didėja, mažėjant temperatūrai ir didėjant slėgiui.

Jeigu pusiausviras su skysčiu yra dujų mišinys, tai kiekvienas šio mišinio komponentas atskirai turi tenkinti Henrio dėsnį.

Kaip buvo minėta anksčiau, Henrio dėsnis tinka idealiems tirpalams, todėl realiai jis taikomas tik labai praskiestiems tirpalams. Padidėjus slėgiui, skysčio tūrio pasikeitimas tirpstant dujoms yra tos pačios eilės, kaip dujų tūrio pasikeitimas. Pusiausvyrai aprašyti tokiu atveju negalima taikyti Henrio dėsnio. Tokiomis sąlygomis fazių pusiausvyros konstantą galima aprašyti taip:

$$A_p = E/f_0 ; \tag{17.6}$$

čia f_0 – absorbuojamų dujų lakumas, išreikštas slėgio vienetais.

Lakumo skaičiavimas yra pateikiamas specialioje literatūroje. Absorbcijos procesų skaičiavimuose absorbtyvo koncentraciją patogiau reikšti ne masės arba molio dalimis, o santykiniais dydžiais – X, $kmol_{absorbtyvo}/kmol_{absorbento}$. Tada (17.5) lygtis užrašoma taip:

$$Y^*/(1+Y^*) = A_p \cdot X/(1+X),$$

arba

$$Y^* = A_p \cdot X/(1+X-A_p \cdot X) = A_p \cdot X/[1+(1-A_p)X], \qquad (17.7)$$

t. y. dujų ir skysčio sistemos pusiausvyra, kai fazių sudėtys išreikštos santykinėmis koncentracijomis, grafiškai vaizduojama kreivėmis. Kai tirpalai labai praskiesti, t. y. kai dujų koncentracijos skystyje mažos, galima imti $(1-A_p)\cdot X = 0$. Tuomet (17.7) lygties vardiklis tampa lygus vienetui ir lygtis užrašoma taip:

$$Y^* = A_p \cdot X, \qquad (17.8)$$

t. y. esant mažoms dujų koncentracijoms skystyje, Henrio dėsnis vaizduojamas tiese.

(17.8) lygtis nusako ryšį tarp absorbuojamosios medžiagos – absorbtyvo pusiausvirųjų koncentracijų dujinėje (Y^*) ir skystojoje (X) fazėse.

*Ženklas * prie y ir Y rodo, jog nagrinėjama pusiausvyros būsena. Daltono dėsnis teigia, kad dujų mišinio dalinis slėgis (p) yra lygus bendro slėgio (P) ir dujų molinės dalies (y*) sandaugai.*

***Absorbcijos procesuose darbo linija yra aukščiau pusiausvyros kreivės, nes $Y > Y^*$, o desorbcijos procesuose atvirkščiai – darbo linija, kaip ir rektifikacijos procesuose, yra žemiau pusiausvyros linijos $Y < Y^*$.*

Y^* parodo, kiek kilomolių absorbtyvo, esant pusiausvyrai, yra viename kilomolyje inertinių dujų. Y–X diagramoje pusiausvyros tiesė su abscise sudaro kampą, kurio $tg\alpha = A_p$.

Gerai tirpstančių dujų tirpumas, esant didelėms jų koncentracijoms tirpale, yra mažesnis, negu apskaičiuotas pagal Henrio dėsnį.

Jei sistema nepavaldi Henrio dėsniui, (17.5) ir (17.7) lygčių koeficientas A_p yra kintamas dydis, o pusiausvyros linija yra kreivė, kuri brėžiama pagal bandymų metu nustatytus duomenis.

Absorbuojant daugiakomponenčius mišinius, pusiausvyros priklausomybės gerokai sudėtingesnės negu absorbuojant vieną komponentą, ypač tada, kai tirpalas skiriasi nuo idealaus tirpalo. Šiuo atveju kiekvieno komponento dalinis slėgis dujų mišinyje priklauso ne tik nuo jo, bet ir nuo kitų komponentų koncentracijos tirpale, tai yra jis išreiškiamas daugelio kintamųjų funkcija.

Paprastai tokiais atvejais pusiausvyros priklausomybės nustatomos pagal eksperimentinius duomenis.

Jeigu tirpalas idealus ir tik dujinėje fazėje pastebimas nukrypimas nuo idealios būklės, tokiu atveju tirpalo komponentai nereaguoja vienas su kitu. Todėl bet kurio komponento koncentracija dujose (kai temperatūra ir slėgis yra pastovūs) priklauso tik nuo jo koncentracijos skystyje. Tada kiekvienam *i*-ajam komponentui galima pritaikyti (17.5) lygtį:

$$Y_i^* = A_{pi} \cdot X_i . \qquad (17.9)$$

Jo fazių pusiausvyros konstanta A_p priklauso nuo temperatūros ir bendro sistemos slėgio.

Iš čia išplaukia, kad, esant pastoviai temperatūrai, *i*-ojo komponento pusiausvyra praskiestame tirpale Y–X diagramoje vaizduojama tiese, kurios pasvirimo į abscisę kampo tangentas lygus A_p.

Medžiagų balansas. Medžiagų balansas absorbcijos procesuose aprašomas lygtimi

$$V \cdot (Y_p - Y_g) = L \cdot [X_g - X_p];$$

čia V – inertinių dujų debitas, kmol/s; Y_p ir Y_g – absorbtyvo koncentracija dujų mišinyje prieš absorbciją ir po jos, kmol/kmol$_{\text{inertinių dujų}}$; L – absorbento debitas, kmol/s; X_p ir X_g – absorbtyvo koncentracija į aparatą įtekančiame ir iš jo ištekančiame absorbente, kmol/kmol$_{\text{absorbento}}$.

Realiuose procesuose dažniausiai būna žinomos Y, X vertės srautams įtekant į aparatą ir norimas pasiekti absorbcijos laipsnis ε:

$$\varepsilon = \frac{Y_P - Y_g}{Y_P} = 1 - \frac{Y_g}{Y_p} .$$

Šios lygtys taikytinos tuomet, kai nusistovi pusiausvyra tarp skysčio, kuriame ištirpusių dujų koncentracija yra x arba c, ir virš šio skysčio esančių dujų (garų), kurių dalinis slėgis lygus p.

Pagal medžiagų balanso lygtį apskaičiuojamos bendros absorbento sąnaudos

$$L = V \cdot (Y_p - Y_g)/(X_g - X_p) \qquad (17.10)$$

arba sąvitosios jo sąnaudos l, kmol/kmol$_{\text{inertinių dujų}}$:

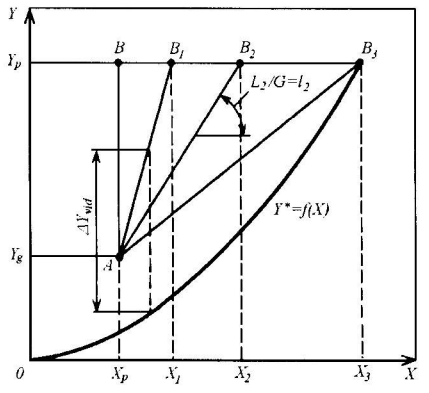
$$l = L/V = (Y_p - Y_g)/(X_g - X_p). \qquad (17.11)$$

(17.11) lygtis gali būti užrašyta taip:

$$(Y_p - Y_g) = l \cdot (X_g - X_p). \qquad (17.12)$$

Ši lygtis nustato ryšį tarp dujų ir skysčio sudėties laisvai pasirinktame aparato skerspjūvyje ir todėl vadinama darbo linijos lygtimi.

Absorbcijos proceso darbo linijos *Y–X* diagramoje. (17.12) lygties grafinis vaizdas *Y–X* koordinačių sistemoje yra tiesė, kurios pasvirimo į abscisę kampo tangentas lygus $l = L/V$.



17.2 pav. Proceso pusiausvyros ir darbo linijos, esant skirtingoms absorbento savitosioms sąnaudoms

Panagrinėsime savitųjų absorbento sąnaudų ir šiam procesui vykdyti reikalingo aparato aukščio skaičiavimą. Naudodamiesi 17.2 pav. nustatysime ryšį tarp savitųjų absorbento sąnaudų ir absorberio aukščio. Nagrinėjamu atveju duota į absorberį įtekančio ir iš jo ištekančio asorbtyvo koncentracija dujų mišinyje: Y_p ir Y_g inertinių dujų debitas V ir absorbtyvo koncentracija į absorberį tiekiamame absorbento sraute X_p.

Taigi kintamieji, nuo kurių priklauso darbo linijų padėtis *Y–X* diagramoje, yra: proceso varos jėga bei absorberio aukštis, absorbento debitas ir absorbato (iš absorberio ištekančio absorbento) koncentracija X_g. Per tašką A, kurio koordinatės Y_g ir X_p, brėžiamos darbo linijos AB_1, AB_2, AB_3, atitinkančios skirtingas absorbato koncentracijas arba absorbento savitąsias sąnaudas. Kadangi dujų pradinė koncentracija Y_p yra pasirinkta, tai taškai B, B_1, B_2, B_3 yra vienoje horizontalioje tiesėje.

Absorbcijos proceso varos jėga ΔY, esant bet kokiai X vertei ir parinktam l dydžiui, bus išreiškiama ordinatės atkarpa $Y–Y^*$, vaizduojama vertikalia atkarpa, jungiančia darbo ir pusiausvyros linijų atitinkamus taškus. Kadangi per visą absorberio aukštį proceso varos jėga kinta, galima imti vidutinę proceso varos jėgos vertę ΔY_{vid}, kuri linijoje AB_1 pavaizduota atkarpa ΔY_{vid}. Varos jėga bus tuo didesnė, kuo statesnė darbo linija ir kartu kuo didesnės savitosios absorbento sąnaudos. Darbo linijai užėmus vertikalią padėtį, ΔY_{vid} turės maksimalią vertę, o kartu absorberio aukštis bus mažiausias. Savitosios absorbento sąnaudos šiuo atveju bus be galo didelės, kadangi $X_p = X_g$ ir (17.11) lygties vardiklis bus lygus nuliui.

Jeigu darbo linija AB_3 liečiasi su pusiausvyros linija, tai savitosios absorbento sąnaudos minimalios (t. y. $l = l_{min}$), o ΔY_{vid} lietimosi taške lygus nuliui, kadangi $Y_p = Y^*$ ir $n_y = \infty$.

Realių technologinių masės mainų procesų, tarp jų ir absorbcijos, metu pusiausvyra tarp fazių nenusistovi ir visada $X_g < X_g^*$ (čia X_g^* – absorbtyvo koncentracija skystyje, pusiausvirame su įtekančiomis dujomis). Todėl l turi būti didesnis už l_{min}, atitinkantį ribinę darbo linijos padėtį, t. y. liniją AB_3. (17.11) lygtyje X_g pakeitę į X_g^*, gausime lygtį minimalioms savitosioms absorbento sąnaudoms apskaičiuoti:

$$l_{\min} = (L/V)_{\min} = (Y_p - Y_g)/(X_g^* - X_p). \qquad (17.13)$$

Didinant savitąsias absorbento sąnaudas l, kartu mažėjant absorberio aukščiui, gali gerokai padidėti jo skersmuo. Tai įvyksta dėl to, kad, didėjant $l = L/V$, taip pat didėja absorbento debitas L (V lieka pastovus). Didėjant absorberio skersmeniui, mažėja leistinas dujų greitis absorberyje, pagal kurį apskaičiuojamas absorberio skersmuo. Todėl, jeigu savitosios absorbento sąnaudos nežinomos (t. y. nežinoma absorbento galinė koncentracija X_g), reikia parinkti tokį absorberio matmenų, jo eksploatacijos sąnaudų ir l dydžio santykį, kuriam esant savitosios absorbento sąnaudos bus optimalios. Optimalias savitąsias absorbento sąnaudas galima nustatyti atlikus proceso techninius ekonominius skaičiavimus.

Šilumos balansas ir absorbento temperatūra. Neizoterminės absorbcijos metu tirpstant dujoms skystyje, dėl išsiskyrusios šilumos tirpalo temperatūra didėja. Atliekant techninius skaičiavimus neatsižvelgiama į dujų sušilimą ir laikoma, kad visa šiluma sunaudojama skysčiui pašildyti.

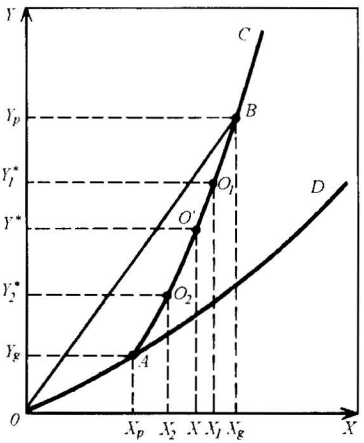
Vykstant izoterminei absorbcijai ir esant į absorberį įtekančio absorbento temperatūrai t_p, pusiausvyros linija vaizduojama kreive OD (17.3 pav.). Jeigu absorbento temperatūra absorbcijos metu didėja, tai pusiausvyros linija išsidėsto aukščiau ir tikroji pusiausvyros linija, kintant temperatūrai, vaizduojama kreive AC.

Jeigu yra žinoma nurodytos sudėties absorbento temperatūra t, tai galima nustatyti kurio nors taško pusiausvyros kreivėje O' ordinatę Y^*, atitinkančią sudėtį X (17.3 pav.). Tam tikslui reikia sudaryti virš laisvai pasirinkto skerspjūvio ploto išsidėsčiusios absorberio dalies šilumos balanso lygtį. Laikant, kad absorbtyvo koncentracija atitinkamai dujų ir skysčio srautuose yra Y ir X, šilumos balanso lygtis atrodys taip:

$$Q_{ab} = q_d \cdot L \cdot (X - X_p) = L \cdot c \cdot (t - t_p), \qquad (17.14)$$

arba $q_d \cdot (X - X_p) = c \cdot (t - t_p)$; (17.14a)

čia q_d – diferencinė dujų tirpumo šiluma, kJ/kmol; L – absorbento debitas, mol/s; c – savitoji specifinė skysčio šiluma, kJ/(kmol K); t – skysčio temperatūra tiriamajame skerspjūvyje, C; t_p – pradinė skysčio temperatūra, °C.



17.3 pav. Absorbcijos pusiausvyros linijos: $0AD$ – vykstant izoterminei absorbcijai, $0AC$ – vykstant neizoterminei absorbcijai

Tada

$$t = t_p - (q_d / c) \cdot (X - X_p). \quad (17.15)$$

Naudojantis (17.15) lygtimi ir laisvai pasirinkus X vertes iš intervalo nuo X_p iki X_g, apskaičiuojama temperatūra t, o po to pagal žinyno duomenis parenkama Y^* ir per taškus O_1, O_2 ir t. t. brėžiama pusiausvyros linija.

17.2. Daugiakomponenčių mišinių absorbcija

Kiekvieno daugiakomponenčių mišinių komponento pusiausvyra užrašoma (17.5) lygtimi:

$$Y_A^* = A_{pA} \cdot X_A,\ Y_B^* = A_{pB} \cdot X_B,\ Y_C^* = A_{pC} \cdot X_C;$$

čia Y^* – komponento pusiausvira koncentracija mišinyje; X – komponento koncentracija viename kilomolyje absorbento; A_p – komponento pasiskirstymo koeficientas, arba fazių pusiausvyros konstanta.

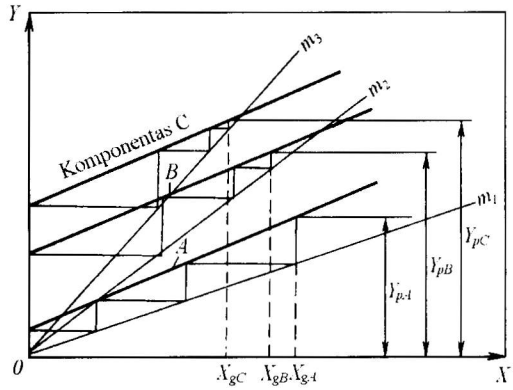
Jeigu sistema apibūdinama Henrio dėsniu, tai fazių pusiausvyros kreivė koordinačių sistemoje X–Y yra tiesė. X–Y diagramoje (17.4 pav.) nubrėžiamos

kiekvieno komponento pusiausvyros linijos (17.4 pav. tokių komponentų yra trys: *A*, *B* ir *C*) ir gaunamas pluoštas tiesių, pasvirusių skirtingais kampais, kurių tangentai atitinkamai lygūs A_{pA}, A_{pB}, A_{pC}.

Kuo mažiau lakus komponentas arba kuo mažiau jis tirpus absorbente, tuo labiau jo pusiausvyros linija nukrypsta nuo abscisės. Toliau toje pačioje diagramoje nubrėžiamos kiekvieno komponento darbo linijos. Darbo linijų lygtys išvedamos iš kiekvieno komponento balanso lygčių:

$$V \cdot (Y_{pi} - Y_{gi}) = L \cdot (X_{gi} - X_{pi}); \qquad (17.16)$$

čia V – inertinių dujų debitas, kmol/s; Y_{pi} ir Y_{gi} – absorbtyvo *i*-ojo komponento koncentracija dujų mišinyje prieš absorbciją ir po jos, $\text{kmol/kmol}_{\text{inertinių dujų}}$; L – absorbento debitas, kmol/s; X_{pi} ir X_{gi} – absorbtyvo *i*-ojo komponento koncentracija, į aparatą įtekančiame ir iš jo ištekančiame absorbente, $\text{kmol/kmol}_{\text{absorbento}}$.



17.4 pav. Daugiakomponentei absorbcijai reikalingo teorinių lėkščių skaičiaus nustatymas

Paprastai visų komponentų santykis L/V yra vienodas, kadangi abiejų fazių srautai pastovūs visame absorberio aukštyje ir todėl visos darbo linijos lygiagrečios. Atliekant skaičiavimus iš anksto negalima patikimai nustatyti iš absorberio ištekančio dujų mišinio visos sudėties, kadangi absorbuojant daugiakomponenčius dujų mišinius galima pasirinkti tik vieno komponento (pvz., *B*), vadinamo pagrindiniu, absorbcijos laipsnį. Žinodami pagrindinio komponento koncentracijas į absorberį įtekančiuose ir iš jo ištekančiuose fazių srautuose, galime nustatyti šiam komponentui paskirstyti reikalingą teorinių lėkščių skaičių. Kitų komponentų koncentracijos iš absorberio ištekančiame fazių sraute priklauso nuo absorberio aukščio arba lėkščių skaičiaus. Taigi koncentraciją X_{gA}, X_{gB}, X_{gC} negalima laisvai pasirinkti, o reikia nustatyti tuo pagrindu,

kad visus komponentus absorberyje atitinka vienodas teorinių lėkščių skaičius (17.4 pav.). Dažniausiai į koloną įtekančiame absorbento sraute komponentų koncentracija lygi nuliui, t. y. jame komponentų nėra. Kaip matyti iš 17.4 pav., likusių komponentų *A* ir *C* koncentracijos iš absorberio ištekančiame dujų mišinio sraute bus lygios Y_{gA} ir Y_{gC}.

Reikia pasakyti, kad didžiausia nelabai lakių komponentų (nagrinėjamu atveju *B* ir *C*) masės pernašos proceso varos jėga bus srautams ištekant iš absorberio, o lakesnių komponentų (nagrinėjamu atveju *A*) – srautams įtekant į absorberį.

Nagrinėtas metodas taikytinas tik nekoncentruotiems dujų mišiniams ir nelabai koncentruotiems skysčiams.

17.3. Absorbcijos kinetika

Fizikinės absorbcijos kinetika. Absorbcijos proceso greitis gali būti nagrinėjamas, naudojant 16-oje dalyje pateiktus dėsningumus, pvz., absorbcijai galima taikyti masės perdavimo (16.3) lygtį. Jeigu varos jėgą išreikšime koncentracijomis dujų fazėje, tai lygtis bus užrašoma taip:

$$M = K_y \cdot F \cdot \Delta y_{vid} . \qquad (17.17)$$

Jeigu proceso varos jėga išreiškiama koncentracijomis skystyje, tai masės perdavimo lygtis užrašoma taip:

$$M = K_x \cdot F \cdot \Delta x_{vid} . \qquad (17.17a)$$

Absorbcijai taikomoje masės perdavimo lygtyje (17.17) koncentraciją dujų sraute moliais galima pakeisti dujų daliniu slėgiu, matuojamu bendrojo slėgio dalimis. Tada:

$$M = K_p \cdot F \cdot \Delta p_{vid} ; \qquad (17.17b)$$

čia Δp_{vid} – vidutinė proceso varos jėga, matuojama slėgio vienetais; K_p – masės perdavimo koeficientas, apskaičiuotas varos jėgos, išreikštos absorbtyvo daliniu slėgiu, vienetui.

Masės perdavimo koeficientai K_y ir K_x (17.17) ir (17.17a) lygtyse apskaičiuojami iš (16.35) ir (16.38) lygčių:

$$K_y = \frac{1}{(1/\beta_d)+(m/\beta_{sk})}, \qquad (17.18)$$

$$K_x = \frac{1}{(1/\beta_{sk})+(1/m \cdot \beta_d)} ; \qquad (17.18a)$$

čia β_d – dujų srauto masės atidavimo fazių sąlyčio paviršiui koeficientas; β_{sk} – masės atidavimo nuo fazių sąlyčio paviršiaus absorbento srautui koeficientas.

Gerai tirpstančioms dujoms dydis m nereikšmingas ir pasipriešinimas difuzijai skystyje yra mažas. Tada $1/\beta_d >> m/\beta_{sk}$ ir galima imti $K_y \approx \beta_d$. Jei dujos prastai tirpsta, galima nekreipti dėmesio į pasipriešinimą difuzijai, nes šiuo atveju m ir β_d dideli. Tada $1/\beta_{sk} >> 1/m \cdot \beta_d$ ir galima imti $K_x \approx \beta_{sk}$.

Jeigu pusiausvyros linija yra tiesė, tai proceso vidutinė varos jėga Δp_{vid} pagal analogiją su (16.32) lygtimi išreiškiama taip:

$$\Delta p_{vid} = \frac{\Delta p_{maks} - \Delta p_{min}}{ln(\Delta p_{maks} / \Delta p_{min})}; \qquad (17.19)$$

čia $\Delta p_{maks} = p_p - p_g^*$ ir $\Delta p_{min} = p_g - p_p^*$ – varos jėga absorberio galuose; p_p^* ir p_g^* – absorbtyvo pusiausvirieji daliniai slėgiai, dujoms įtekant į absorberį ir iš jo ištekant; p_p, p_g – absorbtyvo daliniai slėgiai, dujoms įtekant į absorberį ir iš jo ištekant.

Pastaba. Jeigu daliniai slėgiai išreiškiami bendro slėgio P dalimis, tai masės perdavimo koeficientų K_y ir K_p skaitinės vertės vienodos. Jeigu daliniai slėgiai išreiškiami slėgio vienetais (pvz., Pa), tai $K_p = P \cdot K_y$.

Tarp masės perdavimo koeficientų ir masės perdavimo vieneto aukščio (*MPVA*) yra tiesioginis ryšys (žr. 16 dalį). Todėl absorbcijos kinetikos analizė gali būti analogiškai atlikta pagal *MPVA*. Dalinės priklausomybės masės atidavimo koeficientams β_d arba β_{sk}, taip pat K_p ir K_x nustatyti bus nagrinėjamos toliau (17.7 sk.).

Chemosorbcijos kinetika. Chemosorbcijos metu absorbcijos kinetikai nemažą įtaką gali turėti cheminės reakcijos kinetika. Chemosorbcijos proceso greitis priklauso ne tik nuo masės pernašos intensyvumo, bet ir nuo proceso metu vykstančios cheminės reakcijos greičio. Jeigu reakcija vyksta skystyje, tai dalis dujų susijungia su skysčiu. Todėl laisvo absorbtyvo (t. y. nesusijungusio su absorbentu) koncentracija skystyje sumažėja, kas paspartina absorbcijos procesą, palyginti su absorbcija nesant fazių cheminės sąveikos, kadangi proceso varos jėga didėja. Bendruoju atveju chemosorbcijos greitis priklauso tiek nuo reakcijos greičio, tiek nuo masės pernašos tarp fazių greičio. Priklausomai nuo to, koks greitis lemia bendrą masės pernašos greitį, skiriamos kinetinė ir difuzinė chemosorbcijos proceso sritys.

Kinetinėje srityje cheminės reakcijos greitis mažesnis už masės pernašos greitį, todėl jis riboja viso proceso greitį. Difuzinėje srityje ribojančioji stadija yra komponentų difuzija reakcijos zonoje. Difuzijos greitis priklauso nuo hid-

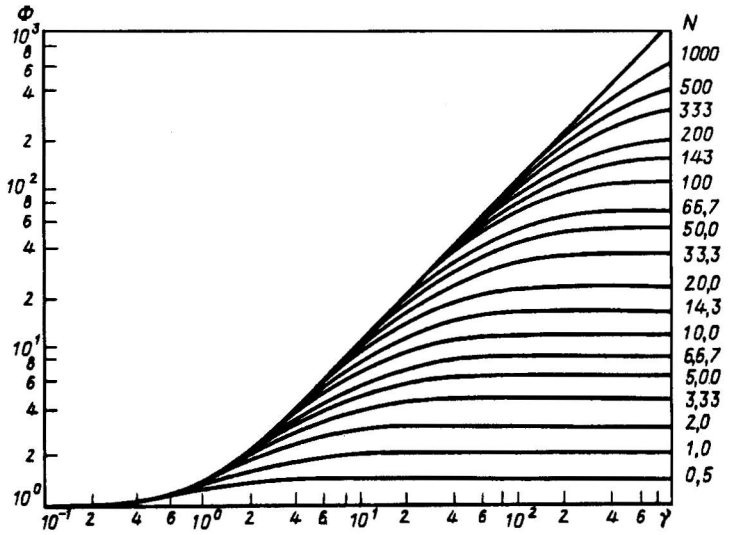
rodinaminių sąlygų sistemoje ir komponentų fizikinių savybių ir nustatomas iš pagrindinės masės pernašos lygties.

Jeigu cheminės reakcijos ir masės perdavimo greičiai yra tos pačios eilės, tai tokie absorbcijos procesai priskiriami mišriajai, arba difuzinei–kinetinei, sričiai.

Nustatant chemosorbcijos procesui atlikti reikalingą fazių kontakto paviršiaus plotą, proceso paspartėjimas gali būti įvertinamas masės atidavimo koeficiento β_{sk} padidėjimu, jeigu tarsim, kad proceso varos jėga bus tokia pat kaip ir fizikinės absorbcijos metu. Tada masės atidavimo, vykstant cheminei reakcijai skystojoje fazėje, koeficientas β_{sk} gali būti apskaičiuotas taip:

$$\beta_{sk} = \beta_{sk} \cdot \Phi ; \qquad (17.20)$$

čia Φ – masės mainų paspartėjimo veiksnys, parodantis, kiek kartų padidėja absorbcijos greitis dėl to, kad vyksta cheminė reakcija.



17.5 pav. Paspartėjimo veiksnio Φ priklausomybė nuo γ ir N

Φ vertę galima pasirinkti naudojant grafiką (17.5 pav.) pagal dydžių γ ir N komplekso vertes. Grafike dydis γ pateiktas antrojo laipsnio reakcijai:

$$\gamma = (k_2 \cdot x_B \cdot D_A)^{0,5} / \beta_{sk} \quad \gamma = (k_2 \cdot x_B \cdot D_A)^{0,5} / \beta_{sk} ;$$

čia k_2 – antrojo laipsnio reakcijos greičio konstanta, $m^3/(kmol \cdot s)$; x_B – absorbento koncentracija, $kmol/m^3$; D_A – absorbtyvo A difuzijos tirpale koeficientas, m^2/s.

Kreivių parametras (17.5 pav.) yra dydis N, apskaičiuojamas pagal tokią lygtį:

$$N = D_B \cdot x_B / \left(n \cdot D_A \cdot x_A^*\right);$$

čia D_B – reagento (absorbento) B jonų difuzijos koeficientas tirpale, m^2/s; x_A^* – sugeriamo komponento (absorbtyvo) A koncentracija fazių sąlyčio paviršiuje; n – stechiometrinis koeficientas.

Kinetinėje ir difuzinėje srityse Φ skaičiavimo lygtys supaprastėja. Kinetinėje srityje, tenkinant sąlygą $5 \le 0{,}5 \cdot (1 + N)$, paspartinimo veiksnys yra $\Phi = \gamma$. Difuzinėje srityje, kai tenkinama sąlyga $\gamma \ge 10 \cdot (1 + N)$, dydis $\Phi = 1 + N$.

17.4. Absorberių konstrukcija ir veikimo principas

Absorbcija, kaip ir kiti masės mainų procesai, vyksta fazių sąlyčio paviršiuje, todėl absorbcijos aparatuose – absorberiuose turi susidaryti didelis fazių sąlyčio paviršius tarp skysčio (absorbento) ir dujų fazės. Pagal konstrukcijos savitumus absorberius galima suskirstyti į keturias grupes: 1) plėvelinius; 2) įkrautinius; 3) lėkštinius ir 4) purkštuvinius. Pagal fazių sąlyčio paviršiaus susidarymą skiriami: 1) absorberiai su pastoviu ir nustatomu fazių sąlyčio paviršiumi; 2) absorberiai, kuriuose fazių sąlyčio paviršius susidaro pačiame procese; 3) absorberiai, kuriuose fazių sąlyčio paviršius didinamas pagalbinėmis priemonėmis.

17.4.1. Plėveliniai absorberiai

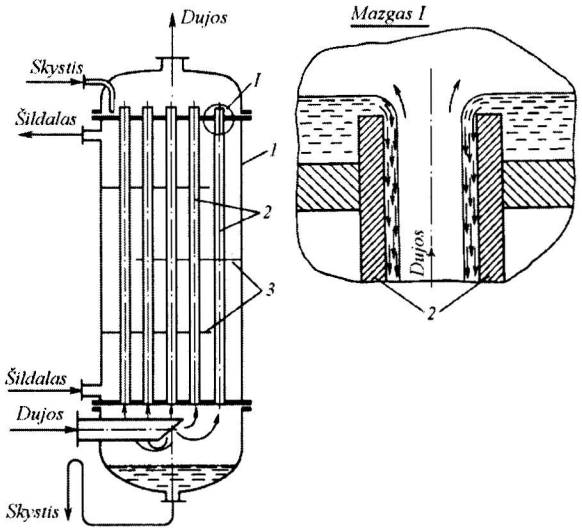
Plėveliniuose absorberiuose fazių sąlyčio paviršius yra lygus standžia sienele (dažniausiai vertikalia) tekančio skysčio paviršiui. Plėveliniai absorberiai skirstomi į 1) vamzdinius; 2) su lygiagrečių plokščių arba plokštelių įkrova; 3) su kylančia arba besileidžiančia skysčio plėvele.

Vamzdinis absorberis (17.6 pav.). Jo konstrukcija tokia pat kaip vamzdinio korpusinio šilumokaičio.

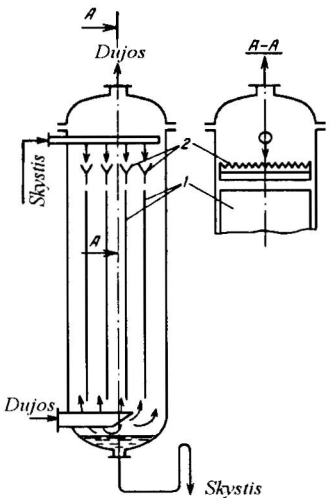
Absorbentas tiekiamas virš viršutinės rėtinės plokštės ir, pasiskirstęs į vertikalius vamzdelius *2*, teka plona plėvele jų vidiniu paviršiumi. Daugiavamzdžiuose absorberiuose, kad absorbentas geriau pasiskirstytų į vamzdelius, įrengiamas specialus skysčio paskirstymo elementas. Dujos teka vamzdžių viduje besileidžiančiai skysčio plėvelei priešinga kryptimi. Jei aušinti būtina, į absorberio tarpvamzdinę erdvę tiekiamas aušinimo vanduo.

Absorberis su plokščia lygiagrečia įkrova (17.7 pav.). Plokščios įkrovos paketas *1*, sudarytas iš įvairių medžiagų (metalų, ant rėmelių ištemptų audinių arba kt.), įdedamas į koloną (absorberį). Viršutinėje absorberio dalyje

įrengtas skysčio paskirstymo elementas *2*, kuris užtikrina, kad abi plokštelės pusės būtų tolygiai padengtos plona skysčio plėvele.



17.6 pav. Vamzdinis plėvelinis absorberis: *1* – korpusas, *2* – vamzdeliai, *3* – pertvaros

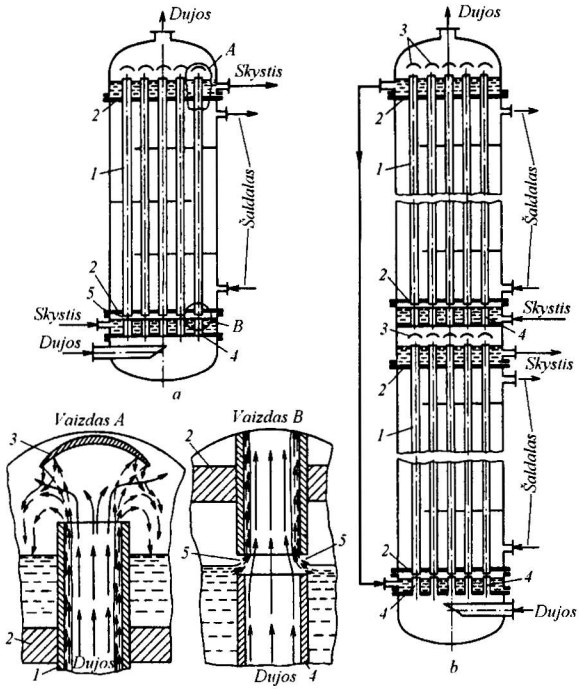


17.7 pav. Plėvelinis absorberis su plokščia lygiagrečia įkrova: *1* – plokščios įkrovos paketai, *2* – paskirstymo mazgas

Hidrodinaminiai plėvelinių absorberių darbo režimai. Vertikalia sienele besileidžiančios skysčio plėvelės hidrodinamika buvo nagrinėjama vadovėlio 6 dalyje. Reikia pasakyti, kad minėtuose plėveliniuose absorberiuose dujų srauto greitis neturi viršyti aparatų „užspringimo" greičio. „Užspringimo" pradžiai būdingas hidraulinio pasipriešinimo, taip pat aparate esančio skysčio kiekio padidėjimas. Truputį padidėjus dujų greičiui, absorberis pradeda pildytis skysčio, per kurį barbotuoja dujos. Toliau didėjant dujų srauto greičiui, skystis išmetamas kartu su dujomis per absorberio viršų.

Priešsroviniuose plėveliniuose absorberiuose leistinas (iki „užspringimo") dujų srauto greitis – 3...6 m/s. Hidraulinis šių absorberių pasipriešinimas yra mažas, nes juose nesusidaro slėgio nuostoliai vietinėms kliūtims nugalėti. Todėl plėveliniai absorberiai naudotini, kai reikia apdoroti didelius dujų kiekius, esant nedideliems absorberių hidrauliniams pasipriešinimams ir nedideliems komponento išgavimo laipsniams.

Plėveliniai absorberiai su kylančia plėvele. Tokius aparatus (17.8 pav., *a, b*) sudaro vamzdžių pluoštas *1*, įtvirtintas rėtinėse plokštėse *2*.



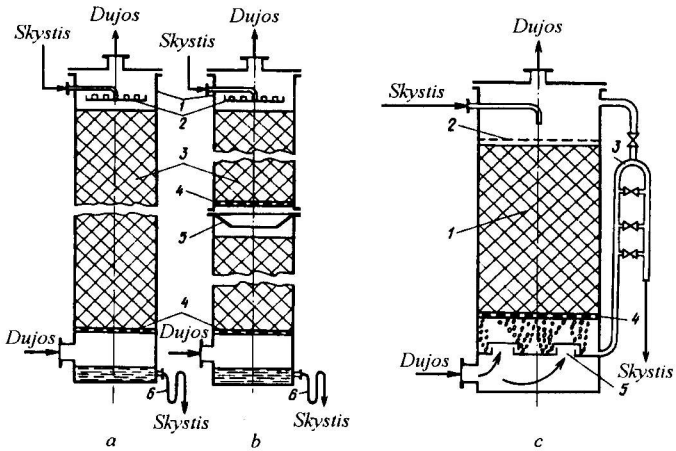
17.8 pav. Plėveliniai kylančio skysčio absorberiai: *a* – vienos pakopos absorberis; *b* – dviejų pakopų absorberis; mazgas *A* – fazių judėjimas, ištekant iš vamzdžių; mazgas *B* – fazių judėjimo schema, įtekant į vamzdžius; *1* – vamzdžiai, *2* – rėtinės plokštės, *3* – purslų gaudyklės, *4* – paskirstomieji atvamzdžiai, *5* – absorbento tiekimo plyšiai

Dujos tiekiamos pro paskirstymo antgalius *4*, kurių ašys sutampa su vamzdelių *1* ašimis. Absorbentas į vamzdžius patenka pro plyšius *5* (elementas *B*). Pakankamai dideliu greičiu judantis dujų srautas pagriebia skysčio plėvelę ir kelia iš apačios į viršų, t. y. absorberis veikia kylančiuoju pasroviniu režimu. Skystis, ištekėjęs iš vamzdžių, išsilieja ant viršutinės rėtinės plokštės ir išteka iš absorberio. Dujų išnešamam purslų kiekiui sumažinti įrengtos purslų gaudyklės *3*. Absorberiui aušinti į jo tarpvamzdinę erdvę tiekiamas aušinimo vanduo. Efektyvumui padidinti naudojami daugiapakopiai absorberiai. Paveiksle (17.8 pav., *b*) pavaizduotas dviejų pakopų plėvelinis kylančio skysčio absorberis. Kiekviena jo pakopa veikia pasroviniu principu, o visame absorberyje dujos ir skystis juda priešsroviniu principu. Daugiapakopių absorberių konstrukcija sudėtingesnė negu vienpakopių.

Aparatuose su kylančiu skysčio srautu galima pasiekti didelį dujų srauto greitį (dešimčių metrų per sekundę), todėl masės perdavimo koeficientai padidėja, tačiau didėja ir aparato hidraulinis pasipriešinimas. Dėl pastarosios aplinkybės šie aparatai absorbcijai nėra plačiai naudojami, kai procesai atliekami sistemose palaikant nedidelius slėgius.

17.4.2. Įkrautiniai absorberiai

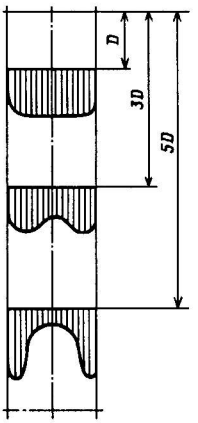
Įkrautiniai absorberiai (17.9 pav., *a, b*) pramonėje plačiai paplitę. Juos sudaro kolona, užpildyta įvairios formos kietais kūnais – įkrova.



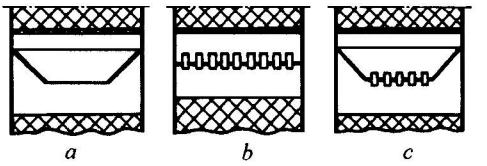
17.9 pav. Įkrautiniai absorberiai: *a* – su vientisu įkrovos sluoksniu, *b* – su į sekcijas pakrauta įkrova: *1* – korpusai, *2* – skysčio skirstytuvai, *3* – įkrova, *4* – atraminiai tinkleliai, *5* – skysčio perskirstytuvas, *6* – hidraulinės užtvaros; *c* – emulgacinė įkrautinė kolona: *1* – įkrova, *2* – įkrovą fiksuojantis tinklelis, *3* – hidraulinė užtvara, *4* – atraminis tinklelis, 5 – dujų skirstytuvas

Įkrautinėje kolonoje *1* įkrova *3* dedama ant atraminių tinklelių *4*, turinčių dujų tiekimo ir skysčio nutekėjimo skylutes arba plyšius. Skystis per paskirstymo elementą *2* gana tolygiai drėkina įkrovą *3* ir plona plėvele teka įkrovos paviršiumi. Tačiau vienodai tolygaus skysčio pasiskirstymo kolonos skerspjūvyje pagal visą kolonos aukštį dėl pasienio efekto buvimo pasiekti negalima. Skystis kaupiasi prie sienelių, palikdamas kolonos centrą tuščią (17.10 pav.).

Tyrimais nustatyta, kad skystis nuo tiekimo vietos susikaupia prie sienelių aukštyje, lygiame 4...5 kolonos skersmenims. Todėl dažnai įkrova kolonoje pakraunama sekcijomis, ne daugiau kaip 3...4 m.



17.10 pav. Drėkinimo skysčio pasiskirstymas pagal įkrautinės kolonos aukštį



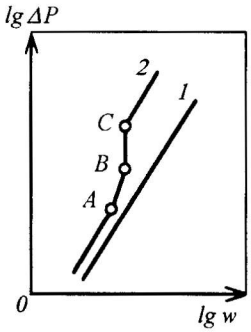
17.11 pav. Skysčio skirstytuvai tarp įkrovos sluoksnių: *a* – kūginis, *b* – su antgaliais, *c* – kūginis su antgaliais

Tarp sekcijų įrengiami skysčio skirstytuvai *5* (17.9 pav., *b*; 17.11 pav.), kurie skystį nuo kolonos sienelės nukreipia į jos centrą. Skystis įkrautiniuose absorberiuose įkrovos elemento paviršiumi teka plona plėvele, todėl fazių sąlyčio paviršius daugiausia yra sudrėkintas įkrovos paviršius. Skysčiui nutekant nuo įkrovos elemento, plėvelė sutrūksta ir ant žemiau esančio elemento formuojasi nauja. Šitaip ant žemiau esančio įkrovos elemento dalis skysčio patenka čiurkšlių, purslų bei lašelių pavidalu. Dalis įkrovos paviršiaus įkrovos elementų tarpusavio lietimosi vietose daugiausia yra drėkinama užsistovėjusio nejudančio skysčio. Tuo skysčio tekėjimas įkrautiniuose absorberiuose skiriasi nuo jo tekėjimo plėveliniuose absorberiuose, kuriuose skystis plėvele teka visame aukštyje. Pagrindinėmis įkrovos charakteristikomis laikomas jos savitasis paviršius a, m^2/m^3, ir laisvasis tūris ε, m^3/m^3. Paprastai dydis ε nustatomas įkrovos užimamą tūrį užpildant vandeniu. Vandens ir įkrovos užimamo tūrio santykis lygus įkrovos ε. Dar viena įkrovos charakteristika yra jos lais-

vasis skerspjūvis S, m^2/m^2. Dažniausiai laikoma, kad įkrovos laisvasis skerspjūvis savo skaitine verte lygus laisvajam jos tūriui, t. y. $\varepsilon = S$.

Hidrodinaminiai įkrautinių absorberių darbo režimai. Pasinaudodami laistomos įkrovos hidraulinio pasipriešinimo priklausomybe nuo dujų greičio kolonoje (17.12 pav.), panagrinėsime hidrodinaminius režimus priešsrovinėse įkrautinėse kolonose.

Pirmasis režimas – plėvelinis; pasireiškia esant nedideliems laistymo tankiams ir dujų greičiams. Šiuo atveju nematyti dujų srauto įtakos skysčio plėvelės tekėjimo įkrova greičiui ir atitinkamai įkrovoje sulaikomam skysčio kiekiui. Plėvelinis režimas baigiasi pirmame perėjimo taške A (17.12 pav.), vadinamame pakibimo tašku.



17.12 pav. Įkrovos hidraulinio pasipriešinimo priklausomybė nuo dujų greičio kolonoje ($L = const$): *1* – sausa įkrova, *2* – drėkinama įkrova

Antrasis režimas vadinamas pakibimo, arba stabdymo, režimu. Po taško A, didinant dujų greitį, didėja skysčio trinties į fazių sąlyčio paviršių jėgos ir plėvelė labiau yra stabdoma dujų srauto. Dėl to sumažėja skysčio plėvelės tekėjimo greitis, jos storis ir įkrovoje sulaikoma daugiau skysčio. Pakibimo režimu didėjant srauto greičiui, pažeidžiamas skysčio plėvelės ramus tekėjimas, atsiranda sūkurių, purslų, didėja drėkinamas įkrovos paviršius ir atitinkamai masės perdavimo intensyvumas. Šis režimas pasibaigia taške B.

Trečiasis režimas – emulgavimo režimas, kuris atsiranda dujų greičiui viršijus tašką B atitinkantį greitį. Dėl to skystis kaupiasi laisvajame įkrovos tūryje iki to momento, kai trinties tarp besileidžiančios skysčio plėvelės ir kolona kylančio dujų srauto jėga tampa pusiausvira įkrovos laisvajame tūryje esančio skysčio sunkio jėgai. Šiuo momentu įvyksta fazinis virsmas, arba fazių inversija (skystis tampa terpe, o dujos – disperguota faze). Susidaro dujų skysčio dispersinė sistema, išoriniu savo vaizdu primenanti barbotažinį sluoksnį (putas) arba dujų skysčio emulsiją. Emulgavimo režimas prasideda įkrovos, kurios supylimo tankis visame kolonos skerspjūvyje yra netolygus, siauriausiame skerspjūvyje. Švelniai reguliuojant dujų tiekimą, emulgavimo režimą galima nustatyti visame įkrovos aukštyje (atkarpa BC, 17.12 pav.).

Emulgavimo režimas atitinka maksimalų įkrautinės kolonos efektyvumą pirmiausia dėl fazių sąlyčio paviršiaus padidėjimo, kuris šiuo atveju nusakomas ne tiek įkrovos paviršiumi, kiek dujų skysčio emulsijos, užpildžiusios visą laisvąjį įkrovos tūrį, paviršiumi. Reikia pasakyti, kad šitaip padidėjus

įkrautinės kolonos efektyvumui gerokai padidėja jos hidraulinis pasipriešinimas (atkarpa *BC*). Įkrautinėse kolonose be specialaus įrenginio emulgavimo režimą palaikyti labai sunku, nes dujų greičio kitimo intervalas, kuriam esant įkrautinė kolona dirba emulgavimo režimu (tarp taškų *B* ir *C*), yra mažas. Todėl yra sukurta speciali emulgavimo kolonos konstrukcija (17.9 pav., *c*).

Pakibimo ir emulgavimo režimais tikslinga dirbti tik tuo atveju, kai aparato hidraulinio pasipriešinimo padidėjimas neturi esminės įtakos procesui (pvz., jeigu absorberis dirba esant padidintam slėgiui). Todėl įkrautiniai absorberiai dažniausiai dirba plėveliniu režimu (esant greičiams, mažesniems už tašką *A* atitinkantį greitį). Stabilaus įkrautinių kolonų darbo režimo riba yra dujų greitis w_u, atitinkantis inversijos (arba „užspringimo“) tašką. Šis greitis apskaičiuojamas pagal lygtį

$$lg\{\left[w_u^2 \cdot a/\left(g \cdot S_l^3\right)\right] \cdot \left(\rho_d/\rho_{sk}\right) \cdot 1000 \cdot \mu_{sk}^{0,16}\} = \\ = A - 1{,}75 \cdot \left(L/V\right)^{1/4} \cdot \left(\rho_d/\rho_{sk}\right)^{1/8}; \qquad (17.21)$$

čia a – įkrovos savitasis paviršius, m^2/m^3; g – laisvai krintančių kūnų pagreitis, m/s^2; S_l – laisvasis įkrovos skerspjūvis, m^2/m^2; μ_{sk} – skysčio dinaminė klampa, Pa·s; L ir V' – skysčio ir dujų debitas, m^3/s; skysčio ir dujų sistemoje $A = 0{,}079$.

Iš šios lygties matyti, kad, didėjant laistymo tankiui (arba skysčio debitui), skysčio klampai ir mažėjant jo tankiui, „užspringimo“ greitis mažėja; esant stambiai įkrovai, turinčiai didelį laisvąjį skerspjūvį, ir vienodiems skysčio ir dujų debitams, dydis w_u būna didesnis.

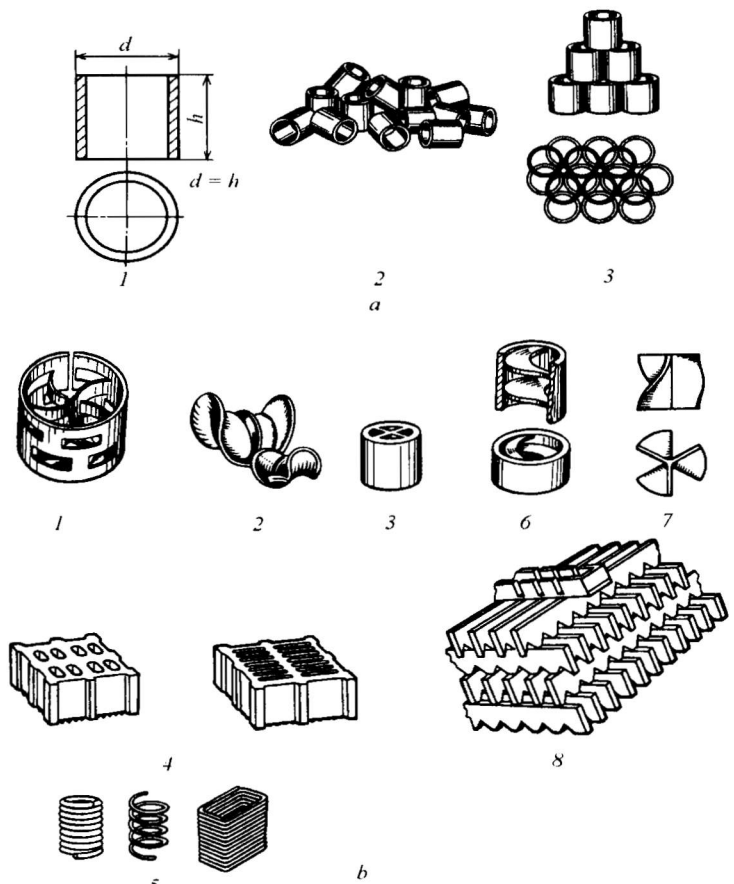
Ketvirtasis režimas (virš taško *C*, 17.12 pav.) – išnešimo arba iš kolonos dujomis išnešto skysčio grįžtamojo judėjimo režimas. Šis režimas realiuose procesuose nesusidaro.

Dujų paskirstymas. Dujų paskirstymo absorberio skerspjūvyje tolygumas priklauso nuo jų tiekimo į absorberį būdo (apie tai buvo kalbama 5 dalyje). Į aparato ašį tiekiamos dujos dažniausiai juda centrinėje jo dalyje tik palaipsniui užpildydamos visą aparato skerspjūvį (žr. 5.1 pav., *a*). Iš šono tiekiamų dujų srautas juda link priešpriešinės sienelės ir tik vėliau į ją atsimušęs pasisuka ir juda aukštyn (žr. 5.1 pav., *d*). Įtekėjimo ir ištekėjimo angų konstrukcijos pakeitimas neturi esminės įtakos dujų srauto pasiskirstymui. Atraminis paskirstymo tinklelis gerokai padidina dujų judėjimo pagrindiniame aparato tūryje tolygumą, toks reiškinys pastebimas, kai rėtinės plokštės (tinklelio) pasipriešinimo koeficientas ξ_p didesnis už tam tikrą dydį ξ_{op}, kuris parenkamas iš žinynų.

Nagrinėjamas atvejis priskiriamas dujų pasiskirstymui tuščioje kolonoje. Dujų srauto greičio pasiskirstymo tolygumui tuščios kolonos skerspjūvyje padidinti įrengiami papildomi ištiesinimo elementai *2* (žr. 5.1 pav., *c*, *e*). Įkrautinėse kolonose ištiesinimo elementų vaidmenį vaidina įkrovos apatiniai

sluoksniai. Tačiau, kad dujos įkrovoje pagal visą jos sluoksnio aukštį netekėtų aplinkiniu keliu, jų srautą reikia tolygiai paskirstyti skerspjūvyje, esančiame žemiau atraminės rėtinės paskirstymo plokštės. Tam tikslui atstumas tarp absorberio dugno ir įkrovos daromas pakankamai didelis, dažniausiai lygus nuo 1,0 iki 1,5 kolonos skersmens *D*.

Įkrovos parinkimas. Jau anksčiau minėta, kad įkrautinėse kolonose fazių sąlyčio paviršius lygus sudrėkintam įkrovos paviršiui. Todėl įkrovos savitasis paviršius turi būti kiek galima didesnis.



17.13 pav. Įkrovos rūšys: *a* – Rašigo žiedų įkrova; *1* – atskiri žiedai, *2* – netvarkingai supilti žiedai, *3* – reguliarioji įkrova; *b* – fasoninė įkrova; *1* – Pallio žiedai, *2* – balno formos įkrova, *3* – žiedai su kryžiaus formos pertvaromis, *4* – keramikos blokai, *5* – iš vielos susukta įkrova, *6* – žiedai su vidine spirale, *7* – propelerinė įkrova, *8* – medžio strypelių įkrova

Be to, įkrova turi tenkinti tokius reikalavimus: 1) turi būti gerai drėkinama absorbento (skysčio), t. y. įkrovos medžiaga turi būti liofilinė drėkinamojo skysčio atžvilgiu; 2) turi sudaryti nedidelį hidraulinį pasipriešinimą dujų srautui, t. y. įkrovos laisvasis skerspjūvis arba tūris turi būti dideli; 3) pasiekti didelį tiek skysčių, tiek dujų absorbavimo našumą, t. y. įkrovos ε ir S_l turi būti dideli; 4) turėti mažą tankį; 5) tolygiai paskirstyti skysčio srautą; 6) būti atspari agresyvių medžiagų veikimui; 7) būti pakankamai mechaniškai stipri; 8) būti pigi.

17.1 lentelė. Įkrovos charakteristikos

Įkrova	Elemento matmenys, mm	S_{sav}, m^2/m^3	Laisvasis tūris, m^3/m^3	Ekvivalentinis skersmuo, m	Įkrovos tankis, kg/m^3
Tvarkingai sukrauta įkrova					
Mediniai strypeliai	10	100	0,55	0,022	210
	20	65	0,68	0,042	145
Keraminiai Rašigo žiedai	50×50×50	110	0,735	0,027	650
	80×80×8	80	0,720	0,036	670
	100×100×100	60	0,720	0,048	670
Netvarkingai suberta įkrova					
Keraminiai Rašigo žiedai	15×15×2	330	0,700	0,009	690
	25×25×3	200	0,740	0,015	530
	50×50×5	90	0,785	0,035	530
Plieniniai Rašigo žiedai	10×10×0,5	500	0,880	0,007	960
	15×15×0,5	350	0,920	0,009	660
	25×25×0,8	220	0,920	0,017	640
Keraminiai Pallio žiedai	25×25×3	220	0,74	0,014	610
	50×50×5	120	0,780	0,026	520
Plieniniai Pallio žiedai	25×25×0,6	235	0,900	0,01	525
	50×50×1	108	0,900	0,033	415
Keraminiai Berlio balnai	12,5	460	0,680	0,006	720
	25	260	0,690	0,011	670
	38	165	0,700	0,017	670
S_{sav} – savitasis paviršius					

Visus reikalavimus tenkinanti įkrova dar nesukurta ir turbūt nebus sukurta, nes, tenkinant vienus reikalavimus, nusižengiama kitiems, pvz., didinant įkrovos savitąjį paviršių a didėja absorberio hidraulinis pasipriešinimas ir mažėja leistinas dujų srauto greitis absorberyje ir t. t.

Todėl pramonėje naudojamos įvairios formos ir dydžio įkrovos, pagamintos iš įvairių medžiagų: metalų, keramikos, plastiko ir kt., kurios tenkina pagrindinius vieno ar kito technologinio proceso reikalavimus.

Dažniausiai naudojami plonasieniai Rašigo žiedai (17.13 pav.), kurių aukštis lygus jų skersmeniui (nuo 15 iki 150 mm). Mažų skersmenų žiedai į kolonas supilami netvarkingai. Dideli žiedai (50×50 mm ir didesni) sukraunami tvarkingai taisyklingomis, viena kitos atžvilgiu paslinktomis eilėmis. Taip sukrauta įkrova vadinama reguliaria, jos hidraulinis pasipriešinimas mažesnis, joje leistinas didesnis dujų greitis, tačiau jai drėkinti reikalingi sudėtingesnės konstrukcijos laistytuvai, negu tokių pat matmenų netvarkingai supiltai įkrovai.

Strypelių įkrova (17.13 pav.) dažniausiai naudojama didelio skersmens absorberiuose. Nors šios įkrovos gamyba paprasta, bet jos savitasis paviršius ir laisvasis skerspjūvis maži, todėl ji keičiama sudėtingesne fasonine įkrova, kurios pavyzdžių pateikta 17.13 pav., *b*.

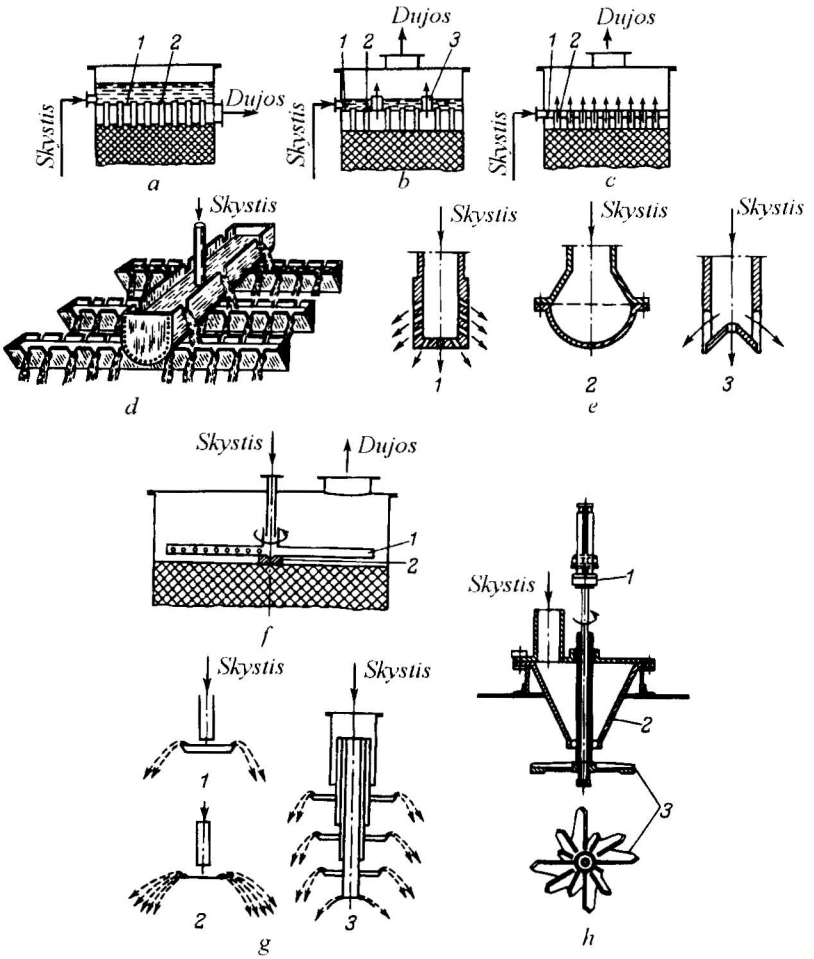
17. 1 lentelėje pateiktos kai kurios įkrovos pagrindinės charakteristikos.

Pasirenkant įkrovos dydį, reikia atsižvelgti į tai, kad, didėjant įkrovos elementų matmenims, leistinas dujų greitis per sluoksnį didėja, o įkrautinio absorberio hidraulinis pasipriešinimas mažėja.

Įkrovos drėkinimas. Įkrova drėkinama, kad kolonoje būtų vienodas darbo režimas ir kuo geriau būtų panaudojama pati įkrova. Geriausiai įkrova drėkinama, kai tiekiamo skysčio debitas yra optimalus. Įkrovai tolygiai drėkinti naudojami specialūs absorberių elementai – laistytuvai (17.14 pav.), kurie skirstomi į čiurkšlinius ir ištaškomuosius. Čiurkšliniams laistytuvams priskiriamos paskirstymo plokštės, loviai, purkštuvai (17.14 pav., *a, e*), o ištaškomiesiems – lėkštiniai, besisukantys, išcentriniai ir kt. (17.14 pav., *g, h*). Reikia pasakyti, kad pirminis iš laistytuvo ištekančio skysčio paskirstymas neišsilaiko jam tekant įkrova (17.10 pav.).

Nuo laistymo būdo priklauso purslų išnešimas iš absorberio ir sudrėkintos įkrovos paviršiaus plotas. Skystis išnešamas dujų srautui veikiant iš laistytuvo ištekantį skystį. Ypač daug skysčio išnešama laistymui naudojant ištaškomuosius laistytuvus, taip pat kai iš čiurkšlinio laistytuvo skystis išteka gana toli nuo įkrovos paviršiaus. Išnešimui sumažinti ant laistytuvo uždedama purslų gaudymo įkrova, dujų ištekėjimo iš absorberių kanaluose įrengiamos purslų gaudyklės ir t. t.

Įkrautinėms kolonoms dirbant plėveliniu režimu, paprastai ne visas įkrovos paviršius sudrėkinamas skysčiu. Tokiu atveju masės mainų paviršiaus plotas būna mažesnis už įkrovos paviršiaus plotą. Sudrėkinto įkrovos paviršiaus ploto a_{sdr} santykis su visu įkrovos paviršiaus plotu vadinamas įkrovos drėkinimo koeficientu ir žymimas ψ, t. y. $\psi = a_{sdr}/a$. Koeficiento ψ vertė priklauso nuo laistymo tankio U, skysčio tiekimo ant įkrovos paviršiaus arba



17.14 pav. Laistytuvai: *a* – paskirstymo plokštės su užtvindytomis angomis, *b* – paskirstymo plokštės su užtvindytomis angomis ir dujų antgaliais, *c* – laisvai išsipilančios paskirstymo plokštės (*1* – tinklelis, *2* – vandens antgaliai, *3* – dujų antgaliai), *d* – paskirstymo loviai, *e* – purslų kėlikliai (*1* – cilindrinis, *2* – pusrutulis, *3* – su plyšiu), *f* – rato tipo purslų kėlikliai (*1* – besisukantis vamzdis su skylutėmis, *2* – guolis), *g* – purslus sukeliantys laistytuvai (*1* – su bortelius turinčia lėkšte, *2* – su lėkšte be bortelių, *3* – su daugeliu lėkščių), *h* – iščentrinis purslus sukeliantis laistytuvas (*1* – pavara, *2* – paskirstymo kūgis, *3* – purslų kėliklis)

drėkinimo taškų skaičiaus n_{dr}. Didėjant U ir n_{dr} iki tam tikros vertės, ψ didėja, o toliau lieka beveik pastovus. Jis taip pat didėja didėjant įkrovos elementams. Dujų greičio kitimas didesnės įtakos įkrovos drėkinimo koeficientui neturi.

Reikia pasakyti, kad tik dalis sudrėkinto paviršiaus yra aktyvus masės perdavimui. Tai paaiškinama tuo, kad aktyvus yra tik tekančia plėvele padengtas paviršius. Paviršiaus dalys, padengtos nejudančia plėvele, nėra aktyvios.

Aktyvaus savitojo įkrovos paviršiaus ploto a_a santykis su visu savituoju įkrovos paviršiaus plotu rodo įkrovos aktyvaus paviršiaus dalį ψ_a, t. y. $\psi_a = a_a/a$. Koeficiento ψ_a vertė, kai $U < 0{,}03$ m^3/(m^2·s) ir įkrova (žiedai, vamzdeliai ir t. t.) sukrauta tvarkingai, gali būti nustatyta naudojantis tokia apytiksle lygtimi:

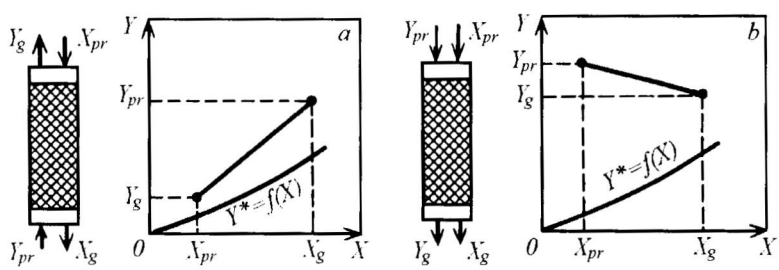
$$\psi_a = U/(0{,}0005 + 0{,}8 \cdot U).$$

Kai $U > 0{,}03$ m^3/(m^2·s), tvarkingai sukrautos įkrovos visas paviršius bus sudrėkintas ir $\psi_a \approx 1$. Jeigu įkrova supilta netvarkingai, tai jos aktyvaus paviršiaus plotą galima apytiksliai apskaičiuoti pagal lygtį

$$a_a = 85 \cdot U/(0{,}00125 + U).$$

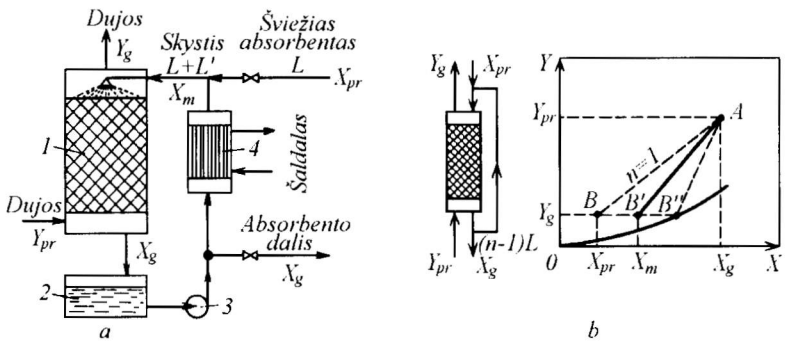
Nagrinėjant įkrautinių absorberių konstrukciją ir veikimo principą, nustatyta, kad šie aparatai veikia fazių srautams judant priešsroviniu principu. 17.15 pav. pavaizduotas priešsrovinių ir pasrovinių absorberių darbas.

Fazėms judant prieš srovę (17.15 pav., *a*), dujos absorberyje juda iš apačios į viršų, o skystis leidžiasi žemyn. Tada ištekančios dujos liečiasi su šviežiu absorbentu, virš kurio absorbtyvo dalinis slėgis labai mažas arba lygus nuliui. Todėl, esant priešsroviam fazių judėjimui, tomis pačiomis pradinėmis proceso sąlygomis pasiekiamas didesnis absorbcijos laipsnis, negu tada, kai procesas vyksta pasroviniu būdu (17.15 pav., *b*), kadangi iš absorberio ištekančiose dujose šiuo atveju absorbtyvo koncentracija Y_g didesnė negu priešsrovinių srautų atveju. Todėl darbo metu fazių srautams judant priešpriešiais absorbento sunaudojama mažiau negu srautams judant pasroviui.



17.15 pav. Absorbcijos schemos: *a* – priešsrovinė, *b* – pasrovinė

Įkrautinių absorberių pranašumai yra paprasta konstrukcija ir mažas hidraulinis pasipriešinimas, o jų trūkumai tokie: sunku aušinti; prastai drėkinama įkrova, esant mažiems laistančiojo srauto tankiams; reikalingi dideli įkrovos tūriai dėl nedidelio jos efektyvumo (palyginti su lėkštiniais aparatais).



17.16 pav. Vienos pakopos absorbcijos, recirkuliuojant skystį, schema (*a*) ir diagrama (b): *1* – absorberis, *2* – tarpinis rezervuaras, *3* – siurblys, *4* – šaldytuvas

Aušinimui ir drėkinimui pagerinti dažnai absorbentas recirkuliuojamas, nors recirkuliacija absorberio konstrukciją padaro sudėtingesnę ir absorbciją pabrangina. Tokio absorberio *1* apačioje (17.16 pav., *a*) dalis skysčio, kuriame absorbtyvo koncentracija X_g, paimama kaip produktas, o kita dalis siurbliu *3* iš tarpinio rezervuaro *2* pakeliama į absorberio viršų ir sumaišoma su šviežiu absorbentu, kuriame absorbtyvo koncentracija X_p. Gaunamas mišinys, kurio koncentracija $X_{miš} > X_p$. Į absorberį grąžinamą absorbentą galima atšaldyti šaldytuve *4*, kas sumažina į aparatą tiekiamo mišinio, o kartu ir proceso, temperatūrą.

Schemoje su absorbento recirkuliacija (17.16 pav.) per absorberį teka $n{\cdot}L$, kmol/s, o recirkuliuoja $(n-1){\cdot}L$, kmol/s, absorbento (čia n – recirkuliacijos kartotinumas, arba per absorberį pratekančio absorbento kilomolių skaičiaus santykis su pradinio absorbento kilomolių skaičiumi). Proceso medžiagų balansas užrašomas tokia lygtimi (žr. 17.2 sk.):

$$V\cdot\left(Y_p - Y_g\right) = L\cdot\left(X_g - X_p\right) = n\cdot L\cdot\left(X_g - X_{miš}\right).$$

Iš čia galima apskaičiuoti cirkuliacijos kartotinumą:

$$n = \left(x_g - x_p\right)/\left(x_g - x_{miš}\right). \qquad (17.22)$$

Jeigu cirkuliacijos kartotinumas žinomas, tai pagal (17.22) lygtį galima apskaičiuoti absorbtyvo koncentraciją mišinyje $x_{miš}$, absorbentui įtekant į koloną:

$$x_{miš} = \left[x_p - (1-n)\cdot x_g\right]/n. \qquad (17.22a)$$

Linija AB' diagramoje Y–X (17.16 pav., *b*) vaizduoja absorbcijos procesą nesant cirkuliacijos ($n = 1$). Šiuo atveju darbo linijos AB' pasvirimo kampo tangentas lygus fazių debitų santykiui L/G. Vykstant recirkuliacijai, darbo linijos pasvirimo kampo tangentas didėja ($n \cdot L/G$) ir procesą vaizduoja linija AB. Darbo linijos pasvirimas, didėjant n, didėja iki ribinio dydžio, kuriam esant taškas B atsiduria pusiausvyros linijoje (linija AB''). Šiuo atveju n vertė yra maksimali ir į absorberį įtekantis mišinys pusiausviras su ištekančiomis dujomis.

Absorberius su absorbento recirkuliacija tikslingas naudoti ir tada, kai pagrindinis pasipriešinimas masės pernešimui koncentruojasi skystojoje fazėje. Tai paaiškinama tuo, kad, esant tam pačiam šviežio absorbento kiekiui, per absorberį šiuo atveju prateka daugiau skysčio. Todėl masės atidavimo skystojoje fazėje koeficientas padidėja.

17.4.3. Lėkštiniai absorberiai

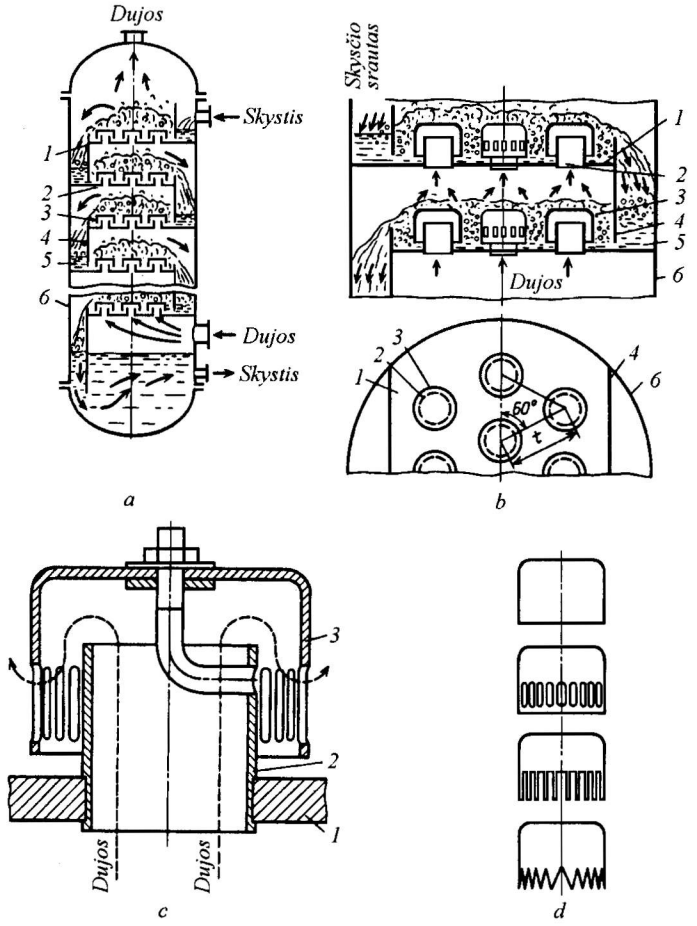
Lėkštiniai absorberiai dažniausiai yra kolonos, t. y. vertikalūs cilindrai, kuriuose tam tikrais tarpais įrengtos horizontalios pertvaros – lėkštės. Lėkštės padidina fazių sąlyčio paviršių, kai jos juda kryptingai. Dažniausiai skystis teka iš viršaus žemyn, o dujos priešingai – iš apačios į viršų (priešsrovinis agentų judėjimas). Taip dujos ir skystis nepertraukiamai tarpusavyje sąveikauja.

Masės pernašos procesas vyksta kolonos lėkštėse susidariusiose skysčio ir dujų sistemose, t. y. procesas vyksta pakopiniu principu, skirtingai negu įkrautinėse kolonose, kuriose procesas vyksta tolydžiai. Todėl lėkštinės kolonos yra pakopiniai aparatai.

Kiekvienoje lėkštėje priklausomai nuo jos konstrukcijos vyksta vienos ar kitos rūšies fazių judėjimas: kryžminis srautas arba idealus skysčio maišymasis. Pagal skysčio persipylimo per lėkštę principą absorberio lėkštės būna su skysčio persipylimo elementais ir be jų arba ištisinio tekėjimo.

Lėkštinės kolonos su skysčio persipylimo elementais. Šioms kolonoms priskiriamos kolonos su gaubtuvinėmis, tinklinėmis, vožtuvinėmis ir kt. lėkštėmis. Lėkštės turi specialius elementus: vamzdelius, kišenes, latakus ir kt., per kuriuos skystis nuo viršutinės lėkštės nuteka į apatinę. Apatinis persipylimo elemento galas įmerktas į žemiau esančioje lėkštėje įrengtą indą (stiklinę), pripildytą skysčio. Taip sudaroma hidraulinė užtvara, trukdanti dujoms prasiveržti pro skysčio persipylimo elementą.

Tokio tipo absorberių darbo principas pavaizduotas 17.17 pav., *a*, kolonoje su gaubtuvinėmis lėkštėmis. Į viršutinę lėkštę tiekiamas skystis teka išilgai lėkštės nuo vieno skysčio persipylimo elemento prie kito, persipila nuo



17.17 pav. Kolonų ir lėkščių su kapsulių formos gaubteliais schemos: *a* – kolona su lėkštėmis, *b* – dvi gretimos lėkštės, *c, d* – kapsulių formos gaubteliai; *1* – lėkštės, *2* – garų vamzdeliai, *3* – apvalūs gaubteliai, *4* – persipylimo pertvaros arba vamzdžiai su slenksčiais, *5* – hidraulinės užtvaros, *6* – kolonos korpusas

vienos lėkštės ant kitos ir išteka iš kolonos apačios. Persipylimo elementai lėkštėse išdėstyti taip, kad gretimose pagal aukštį lėkštėse skystis tekėtų priešingomis kryptimis. Dujos tiekiamos į absorberio apatinę dalį, prateka pro gaubtelių įpjovas (17.17 pav., *c*), po to patenka į ant lėkštės esančio skysčio sluoksnį, kurio aukštis reguliuojamas persipylimo slenksčio aukščiu. Dujos skystyje pasiskirsto burbuliukais, čiurkšlėmis, sudarydamos jame putų sluoksnį, kuriame vyksta pagrindiniai masės ir šilumos pernašos procesai. Tos putos

yra nestabilios ir joms priartėjus prie persipylimo slenksčio skystis tampa skaidrus. Per visas lėkštes pratekėjusios dujos išteka iš viršutinės absorberio dalies.

Hidrodinaminiai lėkštinių kolonų darbo režimai. Kiekvienos konstrukcijos lėkštinių kolonų darbo efektyvumui daugiausia įtakos turi jų hidrodinaminės darbo sąlygos, kurios labiausiai priklauso nuo dujų srauto greičio ir mažiau nuo laistymo tankio bei fazių fizikinių savybių. Pagal dujų srauto greitį skiriami trys hidrodinaminiai lėkštinių aparatų darbo režimai: burbuliukų, putų ir čiurkšlių, arba inžekcinis. Šie režimai tarpusavyje skiriasi ant lėkščių esančio skysčių ir dujų sluoksnio struktūra, kuri iš esmės nusako jo hidraulinį pasipriešinimą, aukštį ir sąlyčio paviršių ant lėkštės.

Burbuliukų, arba barbotažinis, režimas susidaro esant nedideliems dujų greičiams, kada dujos atskirais burbuliukais juda per skysčio sluoksnį. Jeigu atskiri burbuliukai nesusilieja vienas su kitu, tai tokio judėjimo hidrodinamika (burbuliukų skersmuo, jų išplaukimo greitis) gali būti aprašytas atskirų burbuliukų išplaukimo lygtimis (6.1.1 sk.). Fazių sąlyčio paviršius, esant šiam režimui, yra nedidelis.

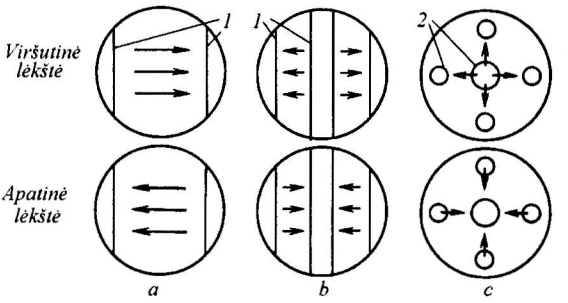
Putų režimas atsiranda padidėjus dujų greičiui, kai pro angas arba plyšelius ištekėję burbuliukai susilieja į čiurkšles, kurios (tam tikru atstumu nuo ištekėjimo vietos) dėl barbotažinio sluoksnio pasipriešinimo suskyla į daugybę smulkių burbuliukų. Taip ant lėkštės susidaro dujų ir skysčio dispersinė sistema, kuri vadinama putomis. Ji yra nestabili ir tuoj pat suyra, nutrūkus dujų tiekimui. Fazių sąlyčio paviršiaus plotas šioje sistemoje yra paviršiaus plotas, susidedantis iš burbuliukų, dujų čiurkšlės ir skysčio lašelių virš dujų ir skysčio sistemos. Jie susidaro suyrant dujų burbuliukams jų ištekėjimo iš barbotažinio sluoksnio momentu. Fazių sąlyčio paviršius putų režimu būna didžiausias, todėl tai yra racionaliausias hidrodinaminis lėkštinių absorberių darbo režimas.

Čiurkšlinis, arba inžekcinis, režimas atsiranda, didinant dujų greitį. Tada dujų čiurkšlių ilgis padidėja ir nusistovi toks režimas, kad jos išteka iš dujų ir skysčio sluoksnio nesuirdamos, bet suirus dideliam kiekiui dujų burbulų susidaro daug purslų. Fazių sąlyčio paviršius būna gerokai mažesnis negu esant putų režimui.

Eksperimentais patikrinta, kad fazių sąlyčio paviršius priklauso nuo skylučių arba plyšelių skaičiaus lėkštėje, kadangi kuo jų daugiau, tuo daugiau dujų čiurkšlių patenka į skysčio ant lėkštės sluoksnį. Pvz., ant gaubtuvinių lėkščių įrengiama daug netoli vienas kito išdėstytų gaubtelių. Šiuo atveju gaubteliai turi daug įpjovų (17.17 pav., *d*), kurios dujų srautą suskirsto į daugybę plonų dujų srautų.

Lėkštinėms kolonoms būdingas hidrodinaminis netolygumas lėkštės ilgyje, kuris atsiranda dėl hidraulinio pasipriešinimo skysčiui judant išilgai lėkštės. Šis netolygumas aiškinamas tuo, kad skysčiui judant lėkšte, jo lygis paky-

la (pvz., dėl gaubtelių buvimo arba veikiant per skystį tekantiems statmeniems dujų srautams) ir skysčio kelyje išilgai lėkštės atsiranda hidraulinis gradientas. Toks reiškinys sukelia netolygų dujų srauto pasiskirstymą lėkštės skerspjūvyje, didesnioji dujų dalis veržiasi per skystį, esantį arti jo persipylimo slenksčio, kur skysčio sluoksnis ploniausias. Tai ypač ryšku, kai lėkštės yra didelio skersmens (nuo 1 iki 2 m) ir turi didelį hidraulinį gradientą. Didelio skersmens (nuo 1 iki 2 m ir daugiau) aparatuose dirbtinai trumpinamas skysčio tekėjimo kelias (17.18 pav., *b*).

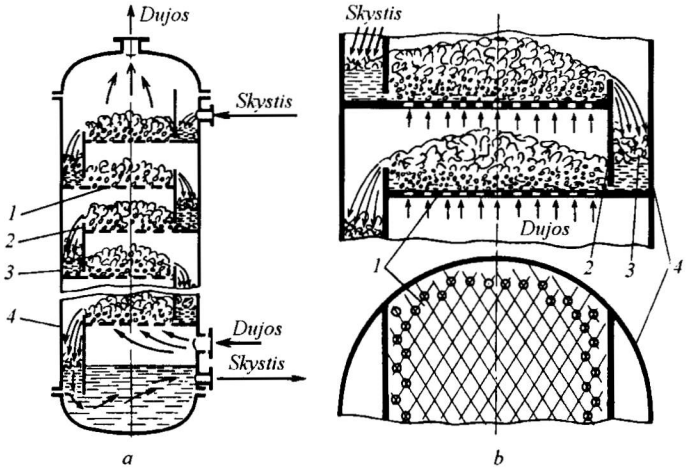


17.18 pav. Lėkštinių kolonų persipylimo latakų tipai: *a* – vieno srauto įrenginys su persipylimo pertvara *1*, *b* – dviejų srautų įrenginys su persipylimo pertvara *1*, *c* – skysčio nukreipimo spindulio kryptimi įrenginys su persipylimo vamzdeliais *2*

Tyrimais nustatyta, kad gaubtuvinės lėkštės stabiliai veikia ir gerokai pasikeitus skysčio ir dujų apkrovai. Šis rodiklis svarbus realiems technologiniams procesams. Šių lėkščių trūkumai: sudėtinga gamyba, didelės metalo sąnaudos, didelis hidraulinis pasipriešinimas ir maži leistini dujų greičiai. Todėl kolonos su gaubtuvinėmis lėkštėmis vis labiau yra išstumiamos efektyvesnių konstrukcijų lėkštinių aparatų.

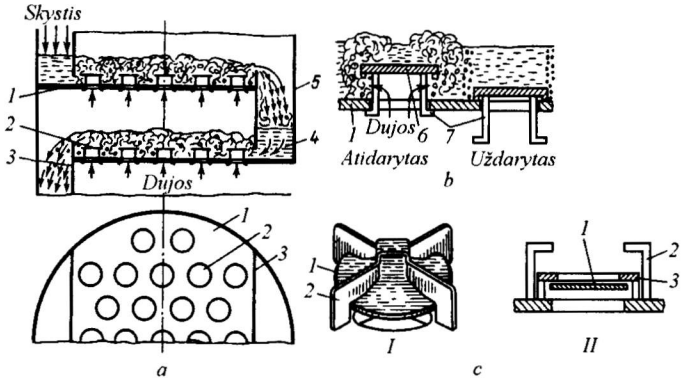
Tinklinės lėkštės. Šios lėkštės (17.19 pav.) turi daugybę 2...8 mm skersmens skylučių, pro kurias į skysčio sluoksnį ant lėkščių prateka dujos. Skysčio sluoksnio aukštis reguliuojamas persipylimo elementu *2*. Esant labai mažam dujų greičiui, dujų srauto dinaminis slėgis būna mažesnis už persipilančio skysčio sluoksnio statinį slėgį. Taigi skystis gali pratekėti pro lėkštės skylutes ant žemiau esančios lėkštės, todėl sumažėja absorbcijos proceso varos jėga. Kad nugalėtų ant lėkštės esančio skysčio sluoksnio slėgį ir sutrukdytų skysčiui pratekėti pro lėkštės skylutes, dujų srautas turi judėti nustatytu greičiu ir pakankamu slėgiu.

Tinklines lėkštes paprasta įrengti, lengva montuoti ir remontuoti, palyginti nedidelis jų hidraulinis pasipriešinimas, gana didelis efektyvumas. Tačiau šios lėkštės jautrios užteršimui nuosėdomis, kurios užkemša jų skylutes. Jeigu staigiai nutrūksta dujų tiekimas arba sumažėja jų slėgis, nuo tinklinės lėkštės nuteka visas skystis ir aparato normaliam darbui atnaujinti procesą būtina pradėti iš naujo.



17.19 pav. Kolonų su tinklinėmis lėkštėmis, turinčiomis persipylimo latakus, konstrukcija: *a* – kolona su lėkštėmis, *b* – dvi gretimos lėkštės; *1* – lėkštės, *2* – persipylimo pertvaros, *3* – hidraulinės užtvaros, *4* – korpusas

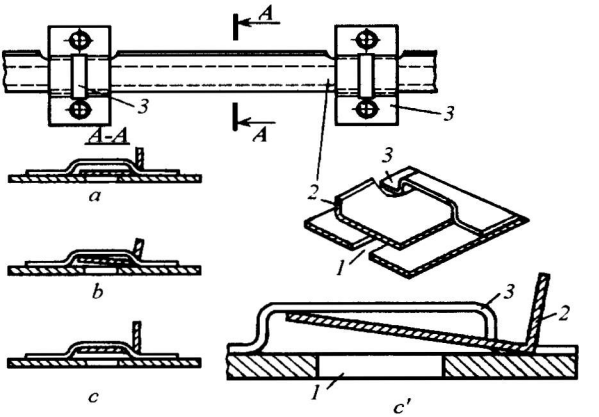
Vožtuvinės lėkštės (17.20 pav., *a*) veikia taip: vožtuvas *2* laisvai guli ant lėkštės *1* skylių, padidėjęs dujų debitas pakelia vožtuvą, todėl padidėja dujų tekėjimo plyšelio tarp vožtuvo ir lėkštės plokštumos skerspjūvio plotas.



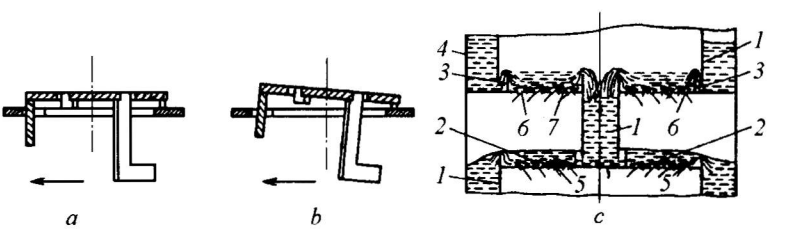
17.20 pav. Lėkščių su vožtuvais konstrukcija: *a* – dvi gretimos lėkštės su apvaliais vožtuvais, *b* – vožtuvo darbo principas: *1* – lėkštė, *2* – vožtuvas, *3* – persipylimo pertvara su slenksčiu, *4* – hidraulinė užtvara, *5* – kolonos korpusas, *6* – vožtuvo diskas, *7* – vožtuvo pakilimo ribotuvas; *c* – apvalūs vožtuvai su viršutiniais ribotuvais (*I*) ir su papildomu svoriu (*II*): *1* – disko formos vožtuvas, *2* – ribotuvas, *3* – papildomas svoris

Dujų greitis šiame plyšelyje, o kartu ir įtekėjimo į ant lėkštės esantį skystį greitis viso proceso metu išlieka beveik pastovus, todėl lėkštė dirba efektyviai ir stabiliai. Hidraulinis lėkštės pasipriešinimas dėl to mažai padidėja. Vožtuvo pakilimo aukštis nustatomas ribotuvu *7* (17.20 pav., *b*) ir yra ne didesnis kaip 6...8 mm. Po vožtuvu esančios angos skersmuo yra nuo 35 iki 40 mm, o paties vožtuvo – nuo 45 iki 50 mm.

Vožtuvinės lėkštės būna ir su stačiakampiais vožtuvais (17.21 ir 17.22 pav.). Jų veikimo principas toks pat, kaip lėkščių su apvaliais vožtuvais. Skirtumas tik tas, kad ant lėkštės su stačiakampiais vožtuvais *2* dalis dujų kinetinės energijos sunaudojama skysčio tekėjimo išilgai lėkštės greičiui padidinti.



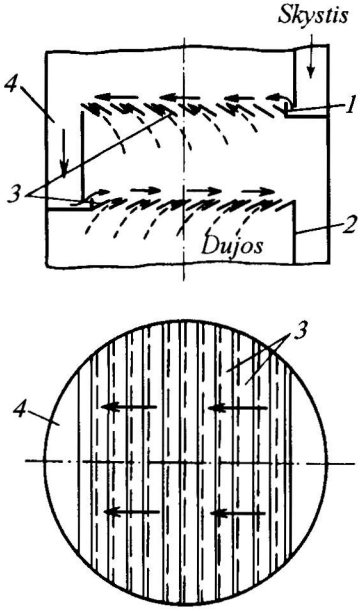
17.21 pav. Stačiakampio vožtuvo konstrukcija: *1* – lėkštės įpjovos, *2* – vožtuvas, esant mažam (*a*), vidutiniam (*b, c'*) ir dideliam (*c*) debitui; *3* – ribotuvai



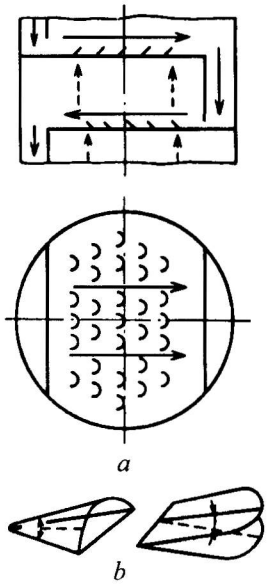
17.22 pav. Pasrovinio vožtuvo konstrukcija ir veikimo principas: *a, b* – skysčiui tekėti uždarytas ir atidarytas vožtuvas (rodyklėmis parodyta skysčio tekėjimo lėkštėje kryptis), *c* – dviejų lėkščių su vožtuvais darbo schema, esant maksimaliam garų debitui; *1* – persipylimo pertvara, *2* – vožtuvai, *3* – užsidarančiosios plokštelės, *4* – kolonos korpusas, *5, 6* –angos lėkštėse, *7* – lėkštė

Vožtuvinių lėkščių pranašumu laikomas jų hidrodinaminis pastovumas ir didelis efektyvumas, kintant dujų debitui plačiame intervale. Šių lėkščių trūkumai yra jų hidraulinio pasipriešinimo padidėjimas dėl vožtuvo masės ir sudėtinga konstrukcija.

Plokštelinės lėkštės. Skirtingai nuo anksčiau aprašytų lėkščių, plokštelinėse lėkštėse abi fazės teka pasroviui (17.23 pav.). Ant plokštelinės lėkštės skystis, kurio judėjimas 17.23 pav. pavaizduotas vientisos linijos rodyklėmis, patenka nuo aukščiau esančios lėkštės į hidraulinę užtvarą *1* ir per persipylimo pertvarą *2* patenka ant lėkštės, sudarytos iš pasvirusių plokštelių *3*. Pritekėjęs iki pasvirusių plokštelių sudaryto pirmo plyšio ir susitikęs su dujomis (punktyrinės rodyklės), kurios juda nuo 20 iki 30 m/s greičiu, skystis prateka pro plyšį. Šiuo atveju dujos iš dalies disperguoja skystį ir jį pastumia iki kito plyšio, kur fazių sąveika kartojama. Todėl ant tokios lėkštės skystis dideliu greičiu, daugiausia lašelių pavidalu, juda nuo persipylimo pertvaros *2* į surinkimo kanalą *4*. Ant plokštelinių lėkščių prie surinkimo kanalo *4* nebūtina įrengti persipylimo slenkstį, todėl sumažėja jų hidraulinis pasipriešinimas.



17.23 pav. Pasvirusiųjų plokštelių lėkštės konstrukcija: *1* – hidraulinė užtvara, *2* – persipylimo pertvara, *3* – plokštelės, *4* – surinkimo kanalas



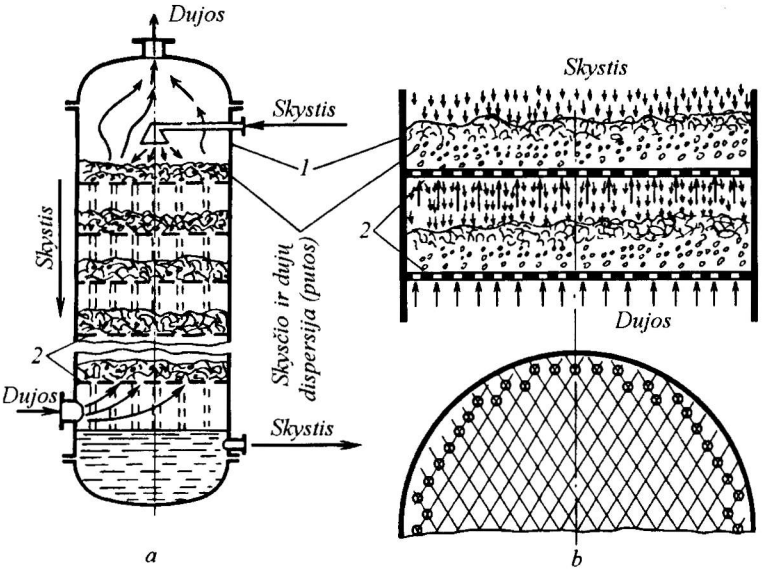
17.24 pav. Žvynelinės lėkštės konstrukcija: *a* – srautų lėkštėje schema: garų (punktyrinė linija), skysčio (vientisa rodyklė), *b* – žvynelių tipai

Taigi plokštelinės lėkštės dirba kitokiomis hidrodinaminėmis sąlygomis negu anksčiau nagrinėtos lėkštės. Skystis ant šios lėkštės virsta dispersine faze, o dujos – dispersine terpe. Toks hidrodinaminis režimas dar vadinamas lašeliniu. Jis leidžia pasiekti didelį absorberio su plokštelinėmis lėkštėmis skysčio ir dujų absorbavimo našumą.

Plokštelinių lėkščių pranašumai: mažas hidrodinaminis pasipriešinimas, didelis skysčių ir dujų absorbavimo našumas, nedidelės metalo sąnaudos jų gamybai. Plokštelinių lėkščių trūkumais laikomas sunkus šilumos tiekimas ir aušinimas, nedidelis efektyvumas, kai mažas skysčio debitas, ir kt.

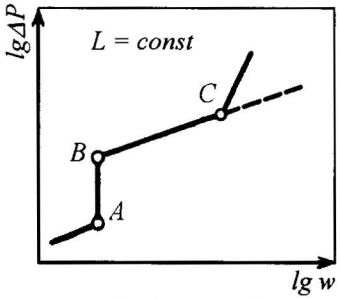
Sukurtos ir kitos pasrovinio fazių tekėjimo lėkščių konstrukcijos, pvz., žvynelinės (17.24 pav.), kurių veikimo principas toks pat kaip plokštelinių lėkščių.

Kolonos su lėkštėmis be skysčio persipylimo elementų arba su tiesioginio tekėjimo lėkštėmis. Lėkštėse be skysčio persipylimo elementų (17.25 pav.) dujos ir skystis teka pro tas pačias angas arba plyšius. Ant lėkštės vykstant fazių sąveikai, skystis nuteka ant žemiau esančios lėkštės, o pro tas pačias angas dujos kyla į aukštesnę kolonos dalį. Tokios lėkštės gali būti vadinamos tiesioginio tekėjimo arba vientisojo pralaidumo lėkštėmis.



17.25 pav. Kolonos su lėkštėmis be skysčio persipylimo kanalo schema: *a* – kolona su lėkštėmis be skysčio persipylimo kanalo, *b* – dvi gretimos skylėtos lėkštės be skysčio persipylimo kanalo (*1* – korpusas, *2* – lėkštės)

Hidrodinaminiai tiesioginio tekėjimo lėkščių darbo režimai. Hidrodinaminiu režimu šios lėkštės normaliai gali dirbti tik dujoms pasiekus nustatytą greitį (17.26 pav.). Esant mažam dujų greičiui (iki taško *B*) skystis ant lėkštės nepasilieka, nes trinties jėgos skysčio ir dujų kontakto paviršiuje yra mažos. Pasiekus greitį, atitinkantį tašką *A*, slėgio nuostoliai ΔP šuoliškai padidėja, kadangi ant lėkščių paviršiaus susidaro skysčio sluoksnis ir lėkštė „pradeda dirbti". Ji dirba esant greičiams iki tašką *C* atitinkančios vertės. Lėkštės darbo metu susidaro anksčiau minėti hidrodinaminiai režimai (režimų susidarymas priklauso nuo daugelio veiksnių – lėkštės skylučių dydžio, skysčio debito ir kt.). Esant dujų greičiams, atitinkantiems taško *C* vertę ir didesniems, kreivėje $\Delta P = f(w)$ gali atsirasti lūžis, kuris aiškinamas staigiu skysčio kiekio ant lėkštės padidėjimu, dėl kurio lėkštė „užspringsta". Esant nedideliems skysčio debitams, dideliems laisviems lėkštės plotams ir dideliam skylučių skersmeniui arba plyšių dydžiui, lėkštės hidraulinis pasipriešinimas momentaliai padidėja, bet kartu daugiau išnešama ir purslų.



17.26 pav. Lėkščių be skysčio persipylimo elementų hidraulinio pasipriešinimo priklausomybė nuo dujų greičio kolonoje

Dujų greitis, atitinkantis lėkščių darbo pradžią ir jų „užspringimą", apskaičiuojamas pagal šias lygtis:

$$Y = A \cdot e^{-4 \cdot x};$$

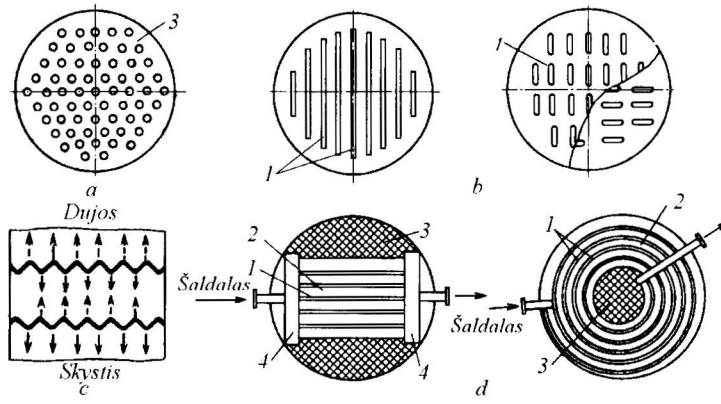
$$Y = \left[w^2 / \left(g \cdot d_{ekv} \cdot F_{sp}^2\right)\right] \cdot \left(\rho_D / \rho_{sk}\right) \cdot \mu_{sk}^2; \qquad (17.23)$$

$$x = \left(L / V\right)^{1/4} \cdot \left(\rho_D / \rho_{sk}\right)^{1/8};$$

čia d_{ekv} – skylučių arba plyšelių ekvivalentinis skersmuo, m; F_{sp} – savitasis pratekamasis lėkštės skerspjūvio plotas, m^2/m^2; μ_{sk} – skysčio dinaminė klampa, Pa·s; *L* ir *V* – skysčio ir dujų debitai, m^3/s; skysčio ir dujų sistemoje $A = 0{,}079$.

Skylėtųjų lėkščių (17.27 pav., *a*) konstrukcija tokia pat kaip ir tinklinių, tik jos neturi skysčio persipylimo elementų. Šių lėkščių skylučių skersmuo 4...10 mm, o kai kada 15...20 mm, ir tai leidžia padidinti skysčio ir dujų apkrovą, esant nedideliam hidrauliniam pasipriešinimui. Laisvas arba skysčio neužimtas lėkštės skylučių suminis skerspjūvio plotas $F_{šv}$ sudaro 10..15 % kolonos skerspjūvio ploto, o kai skylučių skersmuo yra 20...25 mm, laisvasis

skerspjūvio plotas būna gerokai didesnis. Šiuo atveju stabilaus lėkštės darbo intervalas nedidelis. Koeficiento A vertė stabilaus darbo intervalo pradžioje yra 2,95, o intervalo pabaigoje – 10.



17.27 pav. Lėkščių be skysčio persipylimo elementų tipai: *a* – skylėtosios (vaizdas iš viršaus), *b* – rėtinės (vaizdas iš viršaus), *c* – banguotosios (išilginis kolonos pjūvis), *d* – vamzdinės (vaizdas iš viršaus); *1* – plyšys, *2* – vamzdžiai, *3* – perforuotas lapas, *4* – kolektoriai

Rėtinės lėkštės. Jose yra štampuotų 3...8 mm pločio plyšių (17.27 pav., *b*). Skylėtosios ir rėtinės lėkštės lengvai gaminamos ir montuojamos, mažas jų hidraulinis pasipriešinimas, todėl pramonėje jos naudojamos plačiau negu kitų tipų lėkštės.

Banguotosios lėkštės gaminamos iš gofruotų metalinių lakštų su skylutėmis (17.27 pav., *c*). Skystis nuo šių lėkščių išteka pro apatiniame išlinkime esančias skylutes, o dujos teka pro viršutiniame išlinkime esančias skylutes. Tokia lėkščių konstrukcija pailgina stabilaus lėkščių darbo intervalą, tačiau jas gaminti ir montuoti sunkiau negu rėtines ir skylėtąsias lėkštes.

Vamzdinių lėkščių ardeliai gaminami iš lygiagrečių vamzdžių (17.27 pav., *d*), prijungiamų prie kolektoriaus. Šios lėkštės naudotinos, kai skystį reikia šildyti arba aušinti. Vamzdinių lėkščių trūkumai: sudėtinga gamyba ir montavimas, didelės metalo sąnaudos.

17.4.4. Purkštuviniai absorberiai

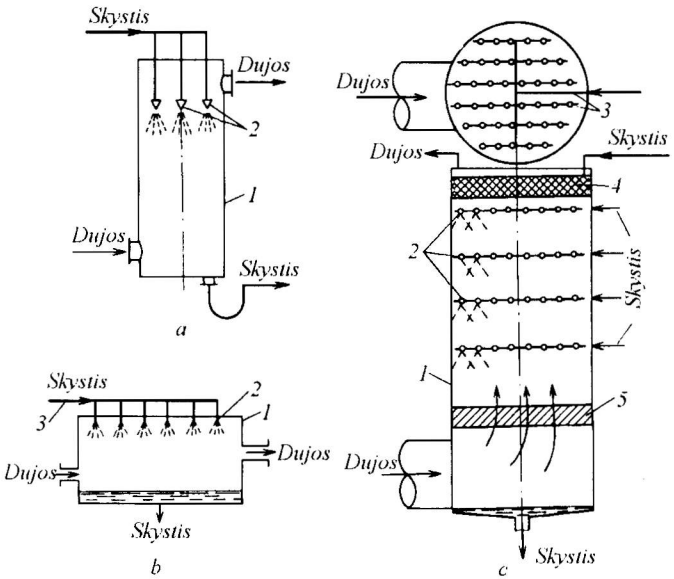
Purkštuviniuose absorberiuose fazių sąlyčio paviršius padidinamas skystį dujų srautе išpurškiant arba paverčiant purslais. Šie absorberiai skirstomi į tokias grupes: 1) absorberius, kuriuose skystis į lašelius paverčiamas purkštukais; 2) absorberiai, kuriuose skysčio lašeliams gauti panaudojama dujų srauto

kinetinė energija; 3) absorberius, kuriuose skystį išpurškia besisukančios detalės.

Tuščiaviduriai purkštuviniai absorberiai. 17.28 pav. pavaizduotos tuščiavidurės kolonos, kuriose dujos juda iš apačios į viršų, o skystis tiekiamas per kolonos *1* viršutinėje dalyje įrengtus purkštukus *2*, nukreiptus iš viršaus žemyn. Tokių absorberių efektyvumas nedidelis, nes dėl netobulo dujų maišymosi kolonos aukštyje, skysčio srautas netolygiai užpildo jos skerspjūvį. Todėl šiuose absorberiuose tūrinis masės perdavimo koeficientas ir pernašos vienetų skaičius yra nedideli. Dėl to purkštukai juose dažnai įrengiami keliais lygiais.

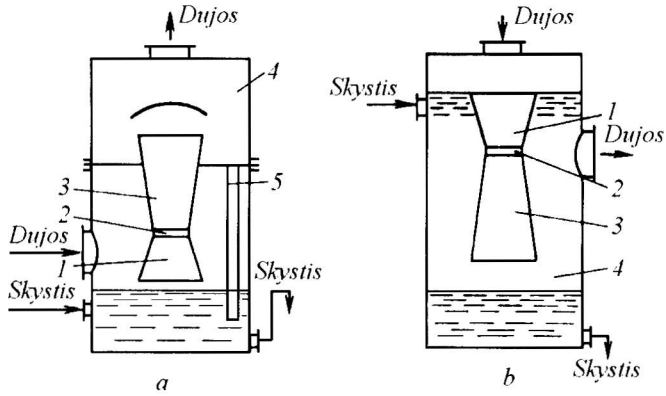
Tokie absorberiai pigūs, nesudėtinga jų gamyba, mažas hidraulinis pasipriešinimas; jais galima apdoroti smarkiai užterštas dujas.

Šios grupės absorberių trūkumai yra nedidelis efektyvumas; mažas leistinas dujų greitis (iki 1 m/s), kad neišneštų skysčio; nepatenkinamas darbas, esant mažiems laistymo tankiams; gana didelės skysčio išpurškimo energijos sąnaudos. Juose geriausia absorbuoti labai tirpias dujas.



17.28 pav. Tuščiaviduriai purkštuviniai absorberiai: *a* – vertikalus, su skysčio purkštukais viršuje, *b* – vertikalus, su skysčio purkštukais, išdėstytais per visą aparato aukštį, *c* – horizontalus su kryžminiais srautais; *1* – korpusai, *2* – purkštukai, *3* – laistomo skysčio kolektorius, *4* – purslų atmušiklis, *5* – dujų paskirstymo tinklelis

Greitieji pasroviniai purkštuviniai absorberiai. Prie šių absorberių priskiriamas Venturio absorberis (17.29 pav.), kurio pagrindinė dalis yra Venturio vamzdelis (žr. 6.12 sk.). Jie pasižymi tuo, kad, esant pasroviniam agentų judėjimui, procesą galima vykdyti, dujoms tekant dideliais greičiais (20...30 m/s). Tokiu atveju dujų srautas visą skystį išneša į separavimo erdvę *4*, kurioje atskiriamas. Skystis įteka į konfuzorių *1*, teka plėvele ir kaklelyje *2* dujų srauto yra išpurškiamas. Po to skystis su dujų srautu išnešamas į difuzorių *3*, kuriame dujų greitis sumažėja ir jo kinetinė energija su minimaliais nuostoliais virsta slėgio energija. Lašeliai atskiriami nuo dujų separatoriuje *4*.

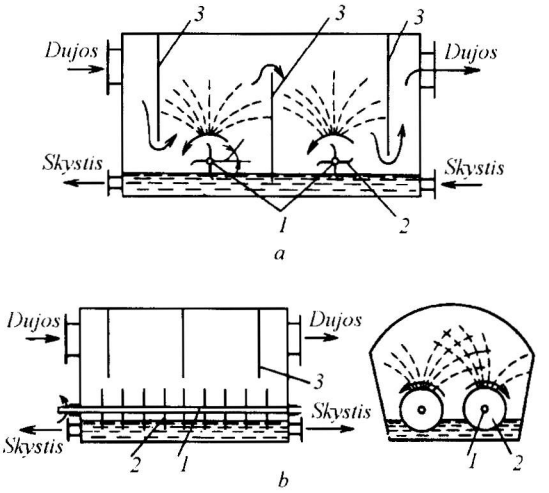


17.29 pav. Purkštuvų neturintis Venturio absorberis: *a* – su skysčio sekcija, *b* – su plėvelinio laistymo įranga; *1* – konfuzoriai, *2* – kakliukai, *3* – difuzoriai, *4* – separatoriai, *5* – cirkuliacijos vamzdis

Mechaniniai purkštuviniai absorberiai (17.30 pav.). Šiuose absorberiuose skystis purslais paverčiamas besisukančiu elementu – mentelėmis *2* (17.30 pav., *a*) arba ant horizontalaus veleno *1* pritvirtintais diskais *2* (17.30 pav., *b*), t. y. fazių sąlyčio paviršiui padidinti energija tiekiama iš šalies. Skystį smulkinantys elementai įrengti taip, kad dujų srautas judėtų statmenai arba lygiagrečiai su jų velenu.

Palyginti su kitų tipų absorberiais, mechaniniai absorberiai kompaktiškesni ir efektyvesni, tačiau sudėtingesnės konstrukcijos ir procesui atlikti sunaudoja daugiau energijos. Todėl mechaninius purkštuvinius absorberius tikslinga naudoti tais atvejais, kai dėl vienų ar kitų priežasčių negalima naudoti purkštukų.

Baigiant skyrių apie absorbcijos aparatų konstrukciją ir veikimo principą, reikia pabrėžti, kad dauguma anksčiau nagrinėtų aparatų naudojama ir kituose masės mainų procesuose, pvz., rektifikacijos arba ekstrakcijos iš skysčių.



17.30 pav. Purkštuviniai absorberiai:
a – skystį purslais paverčia velenai su mentelėmis, *b* – skystį purslais paverčia diskai;
1 – velenai; *2* – purslų kėlikis (pursladaris); 3 – pertvaros

17.5. Absorberių palyginimas

Nors čia aprašėme nemaža skirtingų absorberių, iš tikrųjų pramonė jų gamina kur kas daugiau. Todėl kiekvienam konkrečiam technologiniam procesui parenkant racionaliausią absorberį, tenka spręsti nelengvą uždavinį. Kadangi įvairiose pramonės šakose proceso atlikimo sąlygos ir absorberiams keliami reikalavimai gerokai skiriasi, todėl negalima rekomenduoti arba sukurti universalaus absorberio, kuris visais atvejais būtų geriausias. Konkrečiam procesui atlikti optimalus absorberis bus tas, kurio techniniai ekonominiai rodikliai geriausi. Tokiomis sąlygomis energijos ir absorbento sąnaudos 1 m^3 dujų perdirbti bus mažiausios.

Techniniams ekonominiams skaičiavimams atlikti reikia preliminariai pasirinkti labiausiai tikėtinus absorberių tipus, kuriuos naudojant sėkmingiausiai bus atliekamas konkretus procesas. Patyręs technologas arba projektuotojas, remdamasis sukaupta praktine patirtimi, tokį uždavinį sprendžia intuityviai. Šiam uždaviniui spręsti žinynuose pateikiamos lentelės, kuriose nurodomos pagrindinės proceso atlikimo sąlygos ir ar absorberis atitinka tas sąlygas.

Literatūroje duoti tik orientaciniai rodikliai, ir jie padeda atlikti keleto tipų absorberių techninių ekonominių rodiklių skaičiavimus. Pagal rezultatus pasirenkamas optimalus variantas. Atskirų absorberių skaičiavimo rodikliai

palyginami tarpusavyje ir pasirenkamas tas, kurio gamyba ir eksploatacija pigiausia ir patogiausia.

17.6. Absorberių skaičiavimas

Parinkus absorberio tipą, atliekamas jo skaičiavimas. Dažniausiai, skaičiuojant absorberius, būna žinoma absorbtyvo koncentracija dujose prieš absorbciją ir po jos bei absorbtyvo koncentracija absorbentui įtekant į absorberį. Reikia apskaičiuoti absorbento debitą (sąnaudas) L, absorberio skersmenį D, aukštį H, jo hidraulinį pasipriešinimą ΔP.

Absorbento debitas apskaičiuojamas pagal medžiagų balanso lygtį (17.10), kai nežinoma absorbtyvo koncentracija iš absorberio ištekančiame absorbente x_g. Kaip apskaičiuojama ši koncentracija, esant optimalioms absorbento sąnaudoms, nagrinėjome 17.2 skyrelyje.

Absorberio skersmuo D taip pat apskaičiuojamas pagal debito lygtį:

$$V = w_f \cdot 0{,}785 \cdot D^2 ; \qquad (17.24)$$

čia V – dujų debitas, m^3/s; w_f – fiktyvus dujų greitis, t. y. dujų greitis, apskaičiuotas visam absorberio skerspjūviui, m/s.

Fiktyvaus dujų greičio w_f vertei rasti apskaičiuojamas ribinis dujų greitis skaičiavimo sąlygomis, t. y. „užspringimo“ greitis, o w_f siekia 50...85 % „užspringimo“ greičio.

Absorberio aukščio H skaičiavimas.

Fazių kontakto paviršių kolonose nustatyti sunku. Esant nepertraukiamam fazių kontaktui (kaip tai būna plėveliniuose arba įkrautiniuose absorberiuose) absorberių aukštis H apskaičiuojamas pagal masės perdavimo lygtį, nustačius mainų paviršiaus plotą tarp fazių. Paviršiui nustatyti reikia žinoti paviršiaus arba tūrio masės perdavimo koeficientą. Todėl skaičiuojant reikia atsižvelgti į įkrovos drėkinamą paviršiaus plotą, kuris prilyginamas masės mainų paviršiaus plotui (16.44):

$$H = M/\left(K_y \cdot a \cdot S \cdot \Delta y_{vid} \cdot \psi\right), \qquad (17.25)$$

arba

$$H = M/\left(K_x \cdot a \cdot S \cdot \Delta x_{vid} \cdot \psi\right). \qquad (17.25a)$$

Absorberio aukštį galima apskaičiuoti ir pagal masės perdavimo vienetų skaičių ir jų aukštį:

$$H = h_{0y} \cdot n_{0y}, \text{ arba } H = h_{0x} \cdot n_{0x}.$$

Kolonos aukštį su pakopiniu fazių sąlyčio paviršiumi galima nustatyti naudojant tūrinį masės perdavimo koeficientą, apskaičiuotą ant lėkštės esančio skysčio ir garų mišinio tūrio vienetui, arba masės perdavimo koeficientą, apskaičiuotą lėkštės darbo ploto vienetui. Naudojant šiuos koeficientus, pagal masės perdavimo (16.41) arba (16.70) lygtis nustatomas bendras ant visų lėkščių esančio skysčio ir garų mišinio tūris arba procesui atlikti reikalingas bendras lėkščių darbo plotas. Žinodami ant vienos lėkštės esančio skysčio ir garų mišinio tūrį, nustatome lėkščių skaičių absorberyje. Pakopinio absorberio aukštį galima nustatyti ir teorinių lėkščių metodu arba kolonos naudingumo koeficiento bei kinetinės kreivės sudarymo metodu (žr. 16.7 sk.).

Absorberių hidraulinis pasipriešinimas. Absorberių hidraulinis pasipriešinimas ΔP priklauso nuo hidraulinių režimų, dujų greičio ir aparato konstrukcijos. Optimalų dujų srauto greitį galima nustatyti techniniais ekonominiais skaičiavimais, atsižvelgiant į dujų srauto greičio įtaką aparato hidrauliniam pasipriešinimui, jo skersmeniui ir aukščiui.

Kai proceso metu absorberyje palaikomas slėgis didesnis už atmosferos slėgį, tai hidrauliniai nuostoliai sudaro nedidelę dalį bendro slėgio aparate ir todėl neturi esminės įtakos absorberio techniniams ekonominiams rodikliams. Šiuo atveju tikslinga imti dujų srauto greičius, artimus ribiniams, t. y. „užspringimo“, greičiams. Absorberiuose, kuriuose palaikomas atmosferos arba už jį mažesnis slėgis, rekomenduojama naudoti mažesnius dujų greičius, kad sumažėtų elektros energijos sąnaudos dujoms transportuoti per absorberį. Tyrimais nustatyta, kad daugiau kapitalinių įdėjimų sutaupoma, kai, mažinant absorberio skersmenį, padidinamas dujų greitis, tačiau tada padidėja jo aukštis.

17.6.1. Plėvelinių absorberių skaičiavimas

Vamzdiniams aparatams ribinis dujų greitis (užspringimo greitis) w_u apskaičiuojamas pagal lygtį

$$lg\left[w_u^2 \cdot \rho_d / (g \cdot d_{ekv} \cdot \rho_{sk})\right] \mu_{sk}^{0,16} = A - 1{,}75 \cdot (L'/V')^{1/4} \cdot (\rho_d / \rho_{sk})^{1/8}, \quad (17.26)$$

kurios struktūra yra tokia pat kaip (17.21) lygties, pagal kurią apskaičiuojamas greitis įkrautinėse kolonose, skiriasi tik dydis A. (17.26) lygtyje esantis dydis A apskaičiuojamas taip:

$$A = 0{,}47 - 1{,}5 \cdot lg(d_{ekv}/0{,}025).$$

Pagal pasirinktą vamzdžiuose dujų greičio w vertę apskaičiuojamas bendras vamzdžių skerspjūvio plotas

$$S = V/w,$$

ir, pasirinkus vamzdžių skersmenį (iš intervalo 0,02...0,05 m), nustatomas vamzdžių skaičius n:

$$n = S/0{,}785 \cdot d^2 .$$

Apskaičiavus žingsnį t tarp vamzdžių, $t = k_1 \cdot d_{iš}$ (k_1 dažniausiai parenkamas iš intervalo nuo 1,25 iki 1,5; $d_{iš}$ – išorinis vamzdžių skersmuo, m), apskaičiuojamas absorberio vidinis skersmuo D (skaičiavimams naudojama šilumokaičių skaičiavimo metodika ir lygtys):

$$D = t \cdot (b - 1) + 4 \cdot d_{ekv} ;$$

čia $b = (2 \cdot a_1 - 1)$ – vamzdžių skaičius ilgiausioje šešiabriaunio įstrižainėje (lygtis taikoma, kai vamzdžiai rėtinėje plokštėje išdėstomi koncentriniais šešiakampiais); a_1 – vamzdžių skaičius didžiausio šešiabriaunio kraštinėje.

Absorberio vamzdžių aukštis H apskaičiuojamas taip:

$$H = F_{vmz} / (n \cdot \pi \cdot d);$$

čia F_{vmz} – visų vamzdžių vidinio paviršiaus plotas.

Remiantis prielaida, kad fazių sąlyčio paviršiaus plotas F lygus vidiniam visų vamzdžių paviršiaus plotui ($F = F_{vmz}$),

$$F = n \cdot \pi \cdot d \cdot H .$$

Atsižvelgdami į tai, kad $F = M/(K_y \cdot \Delta y_{vid})$, gausime:

$$H = M/(n \cdot \pi \cdot d \cdot K_y \cdot \Delta y_{vid}). \qquad (17.27)$$

(17.27) lygtyje yra masės perdavimo koeficientas K_y arba K_x, kuriems nustatyti reikia žinoti masės atidavimo dujinėje ir skystojoje fazėse koeficientus β_d ir β_{sk}. Masės atidavimo dujinėje fazėje koeficientai pagal analogiją su šilumos atidavimo koeficientais apskaičiuojami naudojant kriterijų lygtis:

$$Nu'_d = (\lambda/8) \cdot Re_d \cdot (Pr'_d)^{1/3}, \qquad (17.28)$$

$$Nu'_{sk} = B \cdot Re_{sk}^m \cdot (Pr'_{sk})^{0.5} \cdot (\delta_{pl}/H)^p ; \qquad (17.29)$$

čia $Nu'_d = \beta_d \cdot d_{ekv}/D_d$ – difuzinis Nuselto kriterijus dujoms; $d_{ekv} = \pi \cdot d \cdot \delta/(\pi \cdot d) = 4 \cdot \delta$ – ekvivalentinis plėvelės skersmuo, m; D_d – molekulinės difuzijos dujose koeficientas; $Pr'_d = \mu_d/(\rho_d \cdot D_d)$ – difuzinis Prantdlio kriterijus dujoms; $Nu'_{sk} = \beta_{sk} \cdot \delta_{pl}/D_{sk}$ – difuzinis Nuselto krite-

rijus skysčio plėvelei; $Re_{sk} = w_{sk.vid} \cdot \rho_{sk} \cdot d_{ekv} / \mu_{sk}$ – Reinoldso kriterijus skysčio plėvelei; $w_{sk.vid}$ – vidutinis skysčio plėvelės tekėjimo greitis (žr. 6 dalį); $Pr'_{sk} = \mu_{sk} / (\rho_{sk} \cdot D_{sk})$ – difuzinis Prantdlio kriterijus skysčiui; D_{sk} – molekulinės difuzijos skystyje koeficientas; $\delta_{pl} = \left[\mu_{sk}^2 / (\rho_{sk}^2 \cdot g)\right]^{1/3}$ – plėvelės storis (žr. 6.10 sk.).

B, *m* ir *p* vertės, esant įvairiems plėvelės tekėjimo režimams, pateikiamos lentelėje:

Tekėjimo režimas	*B*	*m*	*p*
$Re_{sk} < 300$	0,888	0,45	0,5
$300 < Re_{sk} < 1600$	$1{,}21 \cdot 10^6 \cdot 0{,}909^p$	$(p/3) - 2{,}18$	$(3{,}2 - lg\, Re_{sk})/1{,}47$
$Re_{sk} > 1600$	$7{,}7 \cdot 10^{-5}$	1,0	0

Plėvelinių absorberių hidraulinis pasipriešinimas apskaičiuojamas pagal lygtį, analogišką (6.24) lygčiai:

$$\Delta P = \lambda \cdot (H/d_{ekv}) \cdot \left(w_{san}^2 \cdot \rho_d / 2\right);$$

čia $w_{san} = w + w_{sk.vid}$ – reliatyvusis dujų greitis (esant priešsroviniam fazių judėjimui); λ – trinties koeficientas.

Kai $Re_d < Re_{d.kr}$, trinties koeficientas apskaičiuojamas pagal tokią lygtį:

$$\lambda = 86/Re_d ; \qquad (17.30)$$

kai $Re_d > Re_{d.kr}$,

$$\lambda = \left[0{,}11 + 0{,}9 \cdot (w_{sk.vid} \cdot \mu_{sk} / V)^{2/3}\right] / Re_d^{0{,}16} ; \qquad (17.30a)$$

čia $Re_d = w_{san} \cdot d_{ekv} \cdot \rho_d / \mu_d$ – Reinoldso kriterijus dujoms; $Re_{d.kr}$ – kritinė Reinoldso kriterijaus vertė, nustatoma atsižvelgiant į skysčio plėvelės judėjimo greičio ir jos fizikinių savybių įtaką dujų srauto judėjimo režimui; σ – skysčio paviršiaus įtempis;

$$Re_{d.kr} = \left[\frac{86}{0{,}11 + 0{,}9 \cdot (w_{sk.kr} \cdot \mu_{sk} / \sigma)^{2/3}}\right]^{1{,}19} . \qquad (17.31)$$

17.6.2. Įkrautinių absorberių skaičiavimas

Absorberio skersmuo apskaičiuojamas pagal (17.24) lygtį. Fiktyvus dujų greitis w_0 parenkamas, atsižvelgiant į pagal (17.21) lygtį apskaičiuotą „užspringimo" greitį w_u. Absorberio skersmens skaičiavimas priklauso ir nuo jo įkrovos drėkinimo. Drėkinimo tankio ryšys su absorberio skersmeniu ir absorbento sąnaudomis išreiškiamas lygtimi

$$U = L_0 / \left(0{,}785 \cdot D^2\right); \qquad (17.32)$$

čia U – drėkinimo tankis, $m^3/(m^2 \cdot s)$; L_0 – absorbento sąnaudos, m^3/s.

Turėdami apskaičiuotą U vertę, sudrėkinimo koeficientui ψ nustatyti pasinaudojame tokia lygtimi:

$$\psi = 1 - A \cdot e^{-m}; \qquad (17.33)$$

čia $m = C \cdot Re_{sk}^n = C \cdot \left[4 \cdot U \cdot \rho_{sk} / \left(a \cdot \mu_{sk}\right)\right]$; n – laipsnio rodiklis; dydžių A, C ir n vertės pateikiamos literatūroje (pvz., Rašigo žiedams, kurių skersmuo nuo 15 iki 35 mm, $A = 1{,}02$, $C = 0{,}16$, $n = 0{,}4$).

Žinodami įkrovos savitąjį paviršiaus plotą a, pagal (17.33) lygtį apskaičiuojame sudrėkinamą jos savitąjį paviršiaus plotą $a_{drėk}$. Jeigu esant apskaičiuotai U vertei ψ artima vienetui, tai absorberio skersmens skaičiavimą galima baigti. Jeigu ψ pastebimai skiriasi nuo vieneto, tai įkrovos drėkinamumą reikia laikyti nepatenkinamu ir tada būtina arba padidinti U ir iš naujo perskaičiuoti dujų greičio vertę, arba keisti įkrovą, didinant jos elementų skersmenį. Tai įgalina padidinti leistiną dujų greitį ir sumažinti kolonos skerspjūvį, kad, esant toms pačioms absorbento sąnaudoms, padidėtų laistymo tankis.

Absorberio aukštis. Įkrovos sluoksnio aukštį galima apskaičiuoti pagal (17.25) arba (17.25a) lygtis. Tam tikslui reikia nustatyti masės perdavimo koeficientus K_x ir K_y. Jiems nustatyti reikia žinoti masės atidavimo koeficientus β_{sk} ir β_D, kurie apskaičiuojami naudojant kriterijų lygtis, pritaikytas konkrečiai įkrovai. Pvz., netvarkingai supiltos įkrovos masės atidavimo koeficientas β_D apskaičiuojamas pagal tokią lygtį:

$$Nu_D = 0{,}407 \cdot Re_D^{0{,}655} \cdot \left(Pr_D\right)^{1/3}. \qquad (17.34)$$

Esant žiedinei įkrovai, masės atidavimo skystojoje fazėje koeficientas apskaičiuojamas pagal lygtį

$$Nu'_{sk} = B \cdot \mathrm{Re}_{sk}^m \cdot (\mathrm{Pr}'_{sk})^{0{,}5} \cdot (\delta_{pr} / H)^p. \qquad (17.35)$$

(17.34) ir (17.35) lygčių kriterijuose $Nu_D = \beta_D \cdot d_{ekv} / D_D$ ir $Re_D = w_0 \cdot d_{ekv} \cdot \rho_D / \left(\varepsilon \cdot \mu_D\right)$ apibrėžiančioju geometriniu parametru laiko-

mas įkrovos ekvivalentinis skersmuo $d_{ekv} = 4 \cdot \varepsilon / a$; kriterijuose $Nu_{sk} = \beta_{sk} \cdot \delta_{pr} / D_{sk}$; δ_{pr} – pasirinktas plėvelės storis, m.

Įkrovos sluoksnio storį galima apskaičiuoti, naudojant masės perdavimo vieneto aukštį arba teorinei lėkštei ekvivalentinį įkrovos aukštį. Kokį skaičiavimo metodą naudosime, priklauso nuo to, kurių duomenų turime daugiau. Apskaičiavus įkrovos sluoksnio aukštį ir norint nustatyti absorberio aukštį, jis suskirstomas sekcijomis, taip pat parenkami atstumai tarp įkrovos viršaus ir kolonos viršaus, tarp atraminės įkrovos rėtinės plokštės bei kolonos dugno ir parenkami kitų absorberio dalių aukščiai.

Hidraulinis absorberių pasipriešinimas. Nustatant absorberio hidraulinį pasipriešinimą, pagal žinomą lygtį apytiksliai apskaičiuojamas sausos įkrovos pasipriešinimas ΔP, Pa:

$$\Delta P_{saus} = \lambda \cdot (H / d_{ekv}) \cdot (w^2 \cdot \rho_D / 2); \qquad (17.36)$$

čia λ – pasipriešinimo koeficientas, įvertinantis suminius slėgio nuostolius įkrovoje dėl trinties ir dėl vietinių kliūčių.

λ vertė apskaičiuojama, naudojant empirines lygtis. Pvz., netvarkingai supiltos žiedinės įkrovos pasipriešinimo koeficientas apskaičiuojamas pagal priklausomybes:

- kai $Re_D < 40$ (laminarinis režimas),

$$\lambda = 40 / Re_D; \qquad (17.37)$$

- kai $Re_D > 40$ (turbulentinis režimas),

$$\lambda = 16 / \mathrm{Re}^{0,2}; \qquad (17.38)$$

čia $\mathrm{Re}_D = w \cdot d_{ekv} \cdot \rho_D / \mu_D$ – dujų Reinoldso kriterijus.

Drėkinamos įkrovos hidraulinis pasipriešinimas ΔP_{dr} didesnis už sausos įkrovos hidraulinį pasipriešinimą, kadangi dėl drėkinimo susiaurėja kanalai tarp įkrovos kūnų ir padidėja dujų greitis. Apskaičiuotas drėkinamos įkrovos hidraulinis pasipriešinimas yra labai apytikslis, kadangi priklauso nuo įkrovos sukrovimo būdo, galimo jos elementų netolygumo ir t. t. Kai kolona dirba plėveliniu režimu, hidraulinį drėkinamos įkrovos pasipriešinimą apytiksliai galima apskaičiuoti pagal tokią empirinę lygtį:

$$\Delta P_{dr} = 10^{b \cdot U} \cdot \Delta P_{saus}; \qquad (17.39)$$

čia b – eksperimentiškai nustatytas koeficientas, kurį galima parinkti žinynuose; pvz., įkrovai 25×25×3 mm, kurios $U = (0,5...36,5) \cdot 10^{-3}$ m^3/(m^2·s), b vertė yra 51,2.

17.6.3. Lėkštinių absorberių skaičiavimas

Kolonos skersmuo. Jis nustatomas, atsižvelgiant į lėkščių hidrodinaminį darbo režimą bei leistiną dujų srauto greitį aparate. Absorberio skersmuo apskaičiuojamas pagal (17.24) lygtį.

Absorberio aukštis. Skaičiuojant absorberio lėkštinės dalies aukštį (t. y. atstumą tarp viršutinės ir apatinės lėkščių) pagal masės perdavimo lygtį, masės perdavimo koeficientai nustatomi iš fazių pasipriešinimų adityvumo lygties. Reikia pasakyti, kad koeficientai K_x ir K_y yra skirti masės perdavimo paviršiui, kurį lėkštinėse kolonose galima nustatyti labai apytiksliai, dažniausiai tik esant pirmajam hidrodinaminiam režimui – barbotažiniam, kai dujų greičiai mažesni už laisvo burbuliukų išplaukimo greitį. Kaip apskaičiuojamas fazių kontakto paviršius esant šiam, lėkštiniuose absorberiuose nedažnai naudojamam, režimui, nagrinėjome 6-oje dalyje. Paprastai lėkštiniuose absorberiuose dujų greitis būna didesnis už atskirų burbuliukų išplaukimo greitį, kas iš esmės keičia lėkščių hidrodinaminį darbo režimą ir apsunkina nustatyti lėkštėje esančių fazių tarpusavio kontaktą.

Kadangi ant lėkštės esančių fazių kontakto paviršių nustatyti sunku, masės perdavimo koeficientai skaičiuojami lėkštės skerspjūvio plotui f_l arba ant lėkštės esančių putų tūriui $V_p = f_l \cdot h_p$ (čia h_p – putų sluoksnio aukštis). Tada masės perdavimo vienetų skaičius n_d arba n_{sk} apskaičiuojamas taip:

- dujinei fazei: $n_d = \beta_{dl_l} \cdot f_l / G$; (17.40)
- skystajai fazei: $n_{sk} = \beta_{skl_l} \cdot f_l / L$. (17.41)

Tarp masės atidavimo koeficientų β_{df_l} *ir* β_{skf_l}, nustatytų lėkštės darbo paviršiaus ploto vienetui f_l, bei fazių kontakto paviršiui nustatytų koeficientų β_d *ir* β_{sk} yra tokia priklausomybė:

- dujinei fazei: $\beta_{df_l} = \beta_{dV} \cdot h_p = \beta_d \cdot a \cdot h_p$; (17.42)
- skystajai fazei: $\beta_{skf_l} = \beta_{skV} \cdot h_p = \beta_{sk} \cdot a \cdot h_p$. (17.43)

Kai naudojamos gaubtuvinės lėkštės, dujinės fazės masės perdavimo vienetų skaičius apskaičiuojamas pagal lygtį

$$n_D \cdot (Pr')^{0,5} = 0{,}776 + 4{,}63 \cdot h_{per} - 0{,}238 \cdot w \cdot \rho_D^{0,5} + 0{,}0292 \cdot q\,; \quad (17.44)$$

čia h_{per} – skysčio persipylimo pertvaros aukštis, m; q – savitasis skysčio debitas, apskaičiuotas skysčio persipylimo pertvaros perimetro ilgio vienetui, $m^3/(m \cdot h)$.

Skystosios fazės masės perdavimo vienetų skaičius n_{sk} apskaičiuojamas taip:

$$n_{sk} = 3050 \cdot D_{sk}^{0,5} \cdot \left(68 \cdot h_{per} + 1\right) \cdot \tau_{sk}; \qquad (17.45)$$

čia τ – vidutinė fazių kontakto trukmė, s, kuri apskaičiuojama pagal lygtį

$$\tau_{sk} = l_l \cdot h_p / q_{vid}; \qquad (17.46)$$

čia l_l – skysčio nueitas kelias, t. y. atstumas tarp skysčio persipylimo pertvarų, m; q_{vid} – vidutinis linijinis laistymo tankis, apskaičiuotas vidutiniam lėkštės pločiui, $m^3/(m \cdot s)$.

Pasiūlyta apibendrinta lygtis masės atidavimo koeficientams apskaičiuoti, esant įvairių tipų lėkštėms (tinklinėms, be skysčio persipylimo latakų, vožtuvinėms ir kitoms):

$$Nu' = A \cdot Pe^{0,5} \cdot Hp \cdot \left[\mu_D / (\mu_{sk} + \mu_D)\right]^{0,5}; \qquad (17.47)$$

- dujinei fazei: $Nu_D = \beta_{Dfl} \cdot l / (F_{lais} \cdot D_D)$; $Pe_D = w \cdot l / (\varepsilon \cdot D_D)$;
- skystajai fazei: $Nu_{sk} = \beta_{slfl} \cdot l / D_{sk}$; $Pe_{sk} = U \cdot l / [(1 - \varepsilon) \cdot D_{sk}]$;

čia A – koeficientas; $Hp = \Delta P / (\rho_{sk} \cdot g \cdot l)$ – hidraulinio pasipriešinimo koeficientas, apibūdinantis santykinį savitojo masės perdavimo paviršiaus dydį lėkštėje; $\Delta P = \rho_{sk} \cdot g \cdot h_0$ – ant lėkštės esančio dujų ir skysčio sluoksnio hidraulinis pasipriešinimas, Pa; h_0 – skaidraus (neaeruoto) skysčio sluoksnio ant lėkštės storis, m; Pe_D ir Pe_{sk} – difuzinis Peklė panašumo kriterijus dujinei ir skystajai fazei; l – būdingas linijinis matmuo, prilyginamas vidutiniam burbuliuko arba dujų čiurkšlės skersmeniui barbotažiniame sluoksnyje, m; ε – dujų kiekis barbotažiniame sluoksnyje, m^3/m^3.

Esant intensyviems hidrodinaminiams lėkščių darbo režimams, būdingas linijinis dydis l tampa pastovus, mažai priklausantis nuo fazių greičių ir fizikinių savybių. Todėl masės atidavimo kriterines lygtis, remiantis (17.46) lygtimi, tikslinga pertvarkyti į skaičiuoti patogią formą:

$$\beta_{Dfl} = 6{,}24 \cdot 10^5 \cdot F_{lais} \cdot D_D^{0,5} \cdot (w/\varepsilon)^{0,5} \cdot h_0 \times \left[\mu_D / (\mu_D + \mu_{sk})\right]^{0,5}; \qquad (17.47a)$$

$$\beta_{skfl} = 6{,}24 \cdot 10^5 \cdot D_{sk}^{0,5} \times \left[U/(1 - \varepsilon)\right]^{0,5} \cdot h_0 \times \left[\mu_D / (\mu_{sk} + \mu_D)\right]^{0,5}. \qquad (17.47b)$$

Bet kuriuo iš anksčiau minėtų būdų nustatant tikrąjį lėkščių skaičių n, pirmu priartėjimu galima tarti, kad lėkštėse su skysčio persipylimo elementais skystis ir dujos juda viena kitai statmenomis kryptimis; šiuo atveju proceso varos jėga apskaičiuojama pagal analogiją su kryžminiu srautų judėjimu. Ant lėkščių be skysčio persipylimo elementų vykstančio proceso varos jėga apskaičiuojama pagal fazių visiško susimaišymo schemą (žr. 16.7.2 sk.).

Apskaičiavus tikrąjį lėkščių skaičių, nustatomas absorberio aukštis:

$$H = n \cdot H_L + h_{vir} = n \cdot \left(h_p + H_{s.e}\right) + h_{vir} + h_{apč}\,; \qquad (17.48)$$

čia h_{vir} – atstumas tarp viršutinės lėkštės ir absorberio dangčio, m; $h_{apč}$ – atstumas tarp apatinės lėkštės ir absorberio dugno, kuris pasirenkamas atsižvelgiant į konstrukcinius absorberio ypatumus (dažniausiai šis aukštis pasirenkamas iš intervalo nuo *1* iki *1,5·D*); $H_{s.e}$ – lėkštės separacinės erdvės aukštis.

Lėkštės separacinės erdvės aukštis $H_{s.e}$ sumažina purslų išnešimo, kurio lėkštiniuose aparatuose negalima išvengti, įtaką absorbcijai. Susprogus dujų burbuliukams, ištekantiems į barbotažinio sluoksnio paviršių, dujų srautas pagauna dėl to susidariusius skysčio lašelius. Šie lašeliai, patekę ant aukščiau esančios lėkštės, sumažina masės pernašos proceso varos jėgą ir padidina skysčio persipylimo elementų apkrovimą. Dujos, ištekėdamos iš absorberio, su savimi išneša dalį absorbento, todėl gali susidaryti jo negrįžtami nuostoliai. Šiems nuostoliams sumažinti virš viršutinės absorberio lėkštės įrengiamos įvairių konstrukcijų purslų gaudyklės (įkrovos sluoksnis, gofruoti vertikalūs lakštai ir kt.) arba dujų išleidimo antgalyje įrengiamos lašų gaudyklės. Taigi purslų išnešimo reiškinys yra viena iš pagrindinių priežasčių, trukdančių intensyvinti lėkštiniuose aparatuose vykstančius procesus.

Laikoma, kad leistinas purslų išnešimas e yra ne didesnis kaip 0,1 kg skysčio su 1 kg dujų. Išnešimo dydis staigiai didėja, didėjant dujų greičiui kolonoje w ir mažėjant lėkščių separacinės erdvės aukščiui $H_{s.e}$.

Purslų išnešimui nuo įvairių lėkščių apskaičiuoti yra pasiūlyta tokia lygtis:

$$e = A \cdot f \cdot \left(w^m / \left(H_{s.e} \cdot n\right)\right); \qquad (17.49)$$

čia f – pataisos koeficientas, įvertinantis skysčio savybes ir lygus $0{,}0565 \cdot (\rho_{sk}/\sigma)^{1{,}1}$.

Lentelėje pateikiamos koeficiento A ir laipsnio rodiklių m ir n vertės.

Lėkštės	A	m	n
Be skysčio persipylimo elementų (skylėtosios, rėtinės, banguotosios)	$1{,}4 \cdot 10^{-4}$	2,56	2,56
Vožtuvinės ir balastinės	$6{,}5 \cdot 10^{-5}$	2,15	2,5

Hidraulinis pasipriešinimas. Laistomųjų lėkščių hidraulinis pasipriešinimas ΔP_L apskaičiuojamas kaip trijų dedamųjų suma:

$$\Delta P_L = \Delta P_{s.L} + \Delta P_\sigma + \Delta P_{D.sk};$$

čia $\Delta P_{s.L}$ – sausos lėkštės hidraulinis pasipriešinimas, Pa; ΔP_σ – hidraulinis pasipriešinimas dėl skysčio paviršiaus įtempio jėgų, Pa; $\Delta P_{D.sk}$ – ant lėkštės esančio dujų ir skysčio sluoksnio hidraulinis pasipriešinimas, Pa.

$\Delta P_{s.L}$ apskaičiuojamas pagal lygtį

$$\Delta P_{s.L} = \zeta \cdot \left(w_{skyl}^2 \cdot \rho_D / 2\right);$$

čia $w_{skyl} = V / F_{skyl}$ – dujų greitis lėkštės skylutėse, m/s; V – dujų debitas, m^3/s; F_{skyl} – visų skylučių skerspjūvio plotas, m^2.

Lėkščių pasipriešinimo (vietinės kliūties) koeficientas ζ smarkiai keičiasi (pvz., nuo 0,5 iki 4) ir priklauso nuo lėkščių konstrukcijos. Koeficiento ζ vertės pateikiamos specialioje literatūroje.

Pasipriešinimas ΔP_σ atsiranda todėl, kad dujų srautas, įtekėdamas pro lėkštės skylutes į skysčio sluoksnį ant lėkštės, turi nugalėti skysčio paviršiaus įtempio jėgų pasipriešinimą. Šio pasipriešinimo vertė apskaičiuojama pagal lygtį

$$\Delta P_\sigma = 4 \cdot \sigma / d_{ekv}. \qquad (17.50)$$

Jeigu kolona dirba čiurkšliniu režimu, ΔP_σ galima nepaisyti.

Ant lėkštės esančio dujų ir skysčio sluoksnio hidraulinis pasipriešinimas $\Delta P_{D.sk}$ prilyginamas sluoksnio hidrostatiniam slėgiui:

$$\Delta P_{D.sk} = h_{D.sk} \cdot \rho_{d.sk} \cdot g = h_{sk} \cdot \rho_{sk} \cdot g; \qquad (17.51)$$

čia h_{sk} ir $h_{d.sk}$ – ant lėkštės esančio skysčio ir dujų ir skysčio sluoksnių aukštis, m; ρ_{sk} ir $\rho_{D.sk}$ – ant lėkštės esančio skysčio arba dujų ir skysčio mišinio tankis, kg/m^3.

Tinklinių ir vožtuvinių lėkščių be skysčio persipylimo elementų $\Delta P_{D.sk}$ vertė apskaičiuojama pagal lygtį

$$Eu_0 \cdot \left(\rho_D / \rho_{sk}\right) \cdot F_{sp}^{0,5} = 0{,}25 \cdot Fr_0^{-1,25}; \qquad (17.52)$$

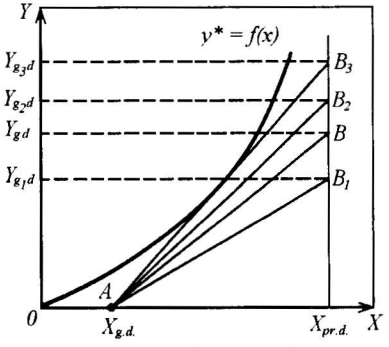
čia $Eu_0 = \Delta P_{D.sk} / \left(\rho_D \cdot w_{skyl}^2\right)$ – Eulerio kriterijus; F_{sp} – savitasis pratekamasis lėkštės skerspjūvio plotas, m^2/m^2; $Fr_0 = w_{skyl}^2 / \left(g \cdot h_{D.sk}\right)$ – Frudo kriterijus.

17.7. Desorbcija

Tai absorbcijai priešingas procesas, naudojamas absorbente ištirpintam absorbtyvui išgryninti, taip pat absorbentui regeneruoti, kad jį būtų galima pakartotinai panaudoti absorbcijos procese. Dujoms iš skysčio desorbuoti būtina, kad šių dujų koncentracija dujinėje fazėje būtų mažesnė už pusiausvirąją koncentraciją skysčio ir dujų sistemoje.

Desorbcijai naudojami tokie trys metodai: 1) distiliacija vandens garais arba inertinėmis dujomis; 2) distiliacija šildant absorbentą; 3) distiliacija sumažinant slėgį virš absorbento.

Praktikoje dažnai naudojami kombinuoti desorbcijos metodai (pvz., sumažinant slėgį virš absorbento ir tuo pačiu metu šildant absorbentą).



17.31 pav. Desorbcijos darbo linijų vaizdavimas *Y–X* diagramoje

Distiliacija vandens garais arba inertinėmis dujomis. Desorbuojant šiuo metodu, vietoj inertinių dujų naudojamas oras. Jeigu oro ir desorbcijai tiekiamo absorbento temperatūra vienoda, tai komponento išskyrimo iš tirpalo šilumos galima nepaisyti ir teigti, kad desorbcija vyksta izotermiškai. Kadangi desorbuojamo komponento dalinis garų slėgis virš tirpalo didesnis už pusiausvirą jo slėgį desorbuojančiame agente, todėl komponentas pereina į oro srautą. Reikia pasakyti, kad po to einantis komponento išgavimo iš inertinių dujų procesas yra gana sunkus. Todėl šis desorbcijos metodas dažniausiai taikomas tada, kai iš inertinių dujų išgautas komponentas toliau nevartojamas (pvz., šis komponentas yra kenksminga priemaiša, bet į aplinką šalinamose dujose jo koncentracija mažesnė už leistiną ribinę koncentraciją *LRK*).

Taigi desorbcijos inertinėmis dujomis procesas yra analogiškas izoterminės absorbcijos procesui, jame procesų pusiausvyros linijos sutampa. Desorbcijos proceso darbo linijai sudaryti panaudojamas proceso medžiagų balansas. Šiuo atveju pasirenkamas absorbento debitas L, pradinė ir galinė absorbtyvo koncentracijos absorbente $X_{p.d}$ ir $X_{g.d}$, bei pradinė koncentracija desorbente $Y_{p.d}$. Tada desorbcijos proceso medžiagų balansas aprašomas lygtimi

$$G_d \cdot Y_{p.d} + L \cdot X_{p.d} = G_d \cdot Y_{g.d} + L \cdot X_{g.d}\,. \qquad (17.53)$$

Pagal šią lygtį apskaičiuojamas desorbento debitas:

$$G_d = \left(L \cdot X_{p.d} - L \cdot X_{g.d}\right) / \left(Y_{p.d} - Y_{g.d}\right). \qquad (17.54)$$

Paprastai desorbcijai tiekiamas desorbentas, kuriame nėra absorbtyvo. Jei $Y_{p.d} = 0$, tada desorbento debitas

$$G_d = \left(L \cdot X_{p.d} - L \cdot X_{g.d}\right) / \left(Y_{p.d}\right), \qquad (17.55)$$

o desorbuoto komponento kiekis

$$G_d \cdot Y_{g.d} = L \cdot X_{p.d} - L \cdot X_{g.d}. \qquad (17.56)$$

Kadangi desorbento debitas G_d arba jo koncentracija po desorbcijos $Y_{g.d}$ nepasirenkami, tai dydis G_d gali būti parinktas taip pat, kaip absorbento kiekis absorbcijos procesui (žr. 17.2 sk.). Fazinėje *Y–X* diagramoje nubrėšime priešsrovinės desorbcijos darbo liniją (taip pat kaip absorbcijos) (17.31 pav.). Matyti, kad pusiausvyros linijai liečiantis su darbo linija AB_3, desorbento sąnaudos bus minimalios, kadangi šiuo atveju (17.55) lygtyje $Y_{g.d}$ bus maksimali, t. y. $Y_{g.d} = Y_{g.dmax}$. Tačiau šiuo atveju proceso varos jėga bus lygi nuliui.

Darbinė G_d vertė atitiks taško B padėtį tarp B_1 ir B_3, kuri bus nustatoma remiantis techninių ekonominių skaičiavimų rezultatais.

Desorbuojant absorbtyvą, kuris netirpsta vandenyje, kaip desorbentą geriau naudoti ne orą, o vandens garus. Šiuo atveju po desorbcijos vandens garų ir desorbuoto komponento mišinį praleidus pro kondensatorių, dujos atskiriamos nuo susikondensavusių vandens garų. Jeigu desorbuotos dujos kondensuojasi kartu su vandens garais (virimo temperatūros artimos), tai dujų kondensatą reikia atskirti nuo vandens; dažnai jam leidžiama nusistovėti.

Jeigu tirpalas į desorbciją patenka absorbento virimo temperatūros, tai ši temperatūra bus pastovi visame absorberio aukštyje ir procesas vyks izoterminėmis sąlygomis. Tiesiogiai tiekiamų vandens garų sąnaudos nustatomos kaip inertinių dujų, nes garai naudojami tik kaip desorbentas. Tokias sąlygas reikia laikyti idealiomis. Realiomis sąlygomis dalis desorbcijai tiesiogiai tiekiamų vandens garų šilumos sunaudojama nuostoliams į aplinką padengti. Todėl tiesiogiai tiekiamų vandens garų sąnaudos bus didesnės už apskaičiuotas inertinių dujų sąnaudas.

Šilumos tiekimas absorbentui. Dėl savo paprastumo šis metodas plačiausiai taikomas pramonėje. Šiuo atveju desorbcijos temperatūra būna aukštesnė už absorbcijos temperatūrą, todėl absorbcijos ir desorbcijos pusiausvyros linijos nesutampa.

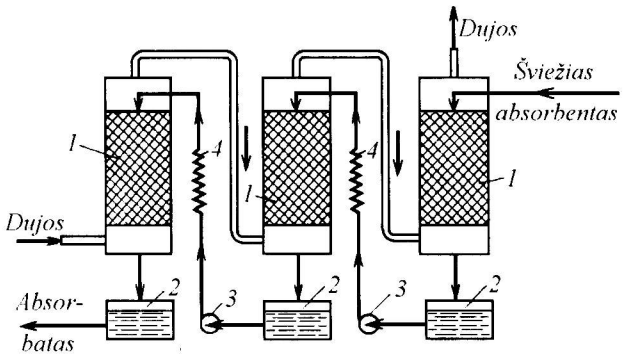
Dažnai desorbcija atliekama, tiekiant šilumą per sienelę. Šiuo atveju virintuve, į kurį tiekiami garai, kartu su desorbuotu komponentu išgaruoja ir dalis absorbento. Gautas mišinys dažniausiai perskiriamas distiliuojant ir rektifikuojant. Tam reikalingi garai iš virintuvo tiekiami į virš jo įrengtą rektifikacijos koloną (žr. 18 dalį).

Slėgio virš absorbento sumažinimas. Šis desorbcijos metodas yra vienas iš paprasčiausių, ypač tada, kai absorbcija vyksta padidinus slėgį. Sumažinus dujų slėgį virš skysčio, tirpale ištirpusių dujų koncentracija tampa didesnė už pusiausvirą šiam slėgiui, todėl dujos skiriasi iš skystosios į dujinę fazę, kol vėl nusistovi pusiausvyra. Šiuo atveju desorbciją galima atlikti, sumažinant slėgį iki atmosferos slėgio. Jeigu absorbcija buvo vykdoma esant atmosferos slėgiui, tai desorbcija atliekama vakuume ir desorbuotas komponentas nusiurbiamas vakuuminiu siurbliu. Kaip buvo minėta anksčiau, siekiant kuo geriau išgauti šalinamą komponentą, desorbcija, mažinant slėgį, derinama su šilumos tiekimu arba su desorbcija inertinių dujų sraute.

17.8. Absorbcijos schemos

Pramoninių absorberių schemas galima suskirstyti į dvi pagrindines grupes: 1) absorberiai, kuriuose absorbentas panaudojamas tik vieną kartą, t. y. kai absorbuoti komponentai nedesorbuojami; 2) absorberiai, kuriuose absorbentas naudojamas daug kartų, t. y. absorbuoti komponentai yra desorbuojami.

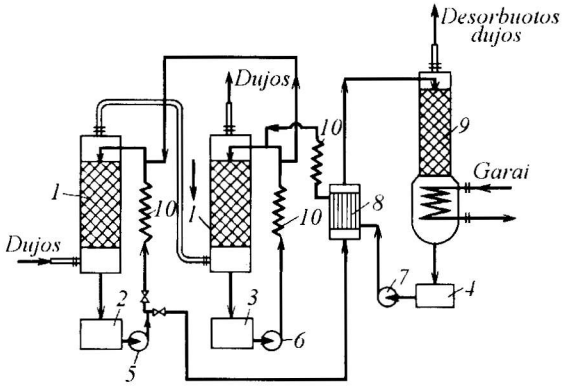
Pirmosios grupės absorberiai (17.32 pav.) naudojami tada, kai po absorbcijos gaunamas gatavas produktas, todėl absorbento regeneruoti nereikia. Juose dažnai iš dujų valomos kenksmingos priemaišos. Šiuo atveju absorbentas turi būti pigus, o absorbtyvo koncentracija jame nedidelė. Tada absorbentas gali būti neregeneruojamas, o panaudojamas kitiems tikslams arba išmetamas į atliekas.



17.32 pav. Priešsrovinis daugiapakopis absorbcijos įrenginys, sudarytas iš nuosekliai sujungtų absorberių ir tarpinių skysčio šaldytuvų: *1* – absorberiai, *2* – tarpiniai rinktuvai, *3* – siurbliai, *4* – šaldytuvai

Absorberiai, kuriuose absorbentas naudojamas daug kartų, pramonėje kur kas labiau paplitę. 17.33 pav. pavaizduota absorberio su absorbento regeneracija ir recirkuliacija schema.

Absorbentas iš paskutinio skysčio judėjimo kryptimi absorberio *1* patenka į rinktuvą *2*, o iš jo siurbliu *5* per šilumokaitį *8* tiekiamas į desorberį *9*, kuriame iš jo pašalinamas absorbuotas komponentas (dujos). Regeneruotas absorbentas transportuojamas per šilumokaitį *8*, kur jis atiduoda šilumą absorbentui, tiekiamam desorbcijai, o paskui per šaldytuvą *10* grįžta atgal pirmam skysčio judėjimo kryptimi absorberiui laistyti.



17.33 pav. Daugiapakopio priešsrovinio absorberio su absorbento regeneracija ir skysčio recirkuliacija atskirose absorbcijos pakopose schema: *1* – absorberiai, *2, 3, 4* – rinktuvai, *5, 6, 7* – siurbliai, *8* – šilumokaitis, *9* – desorberis, *10* – šaldytuvai

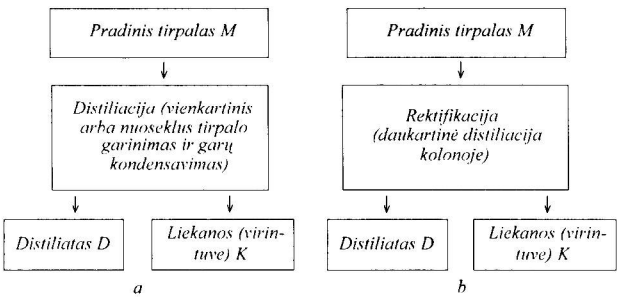
Nagrinėtose schemose naudotos įkrautinės kolonos, kuriose absorbcijos šilumą šalinti sunkiau. Lėkštinėse kolonose absorbcijos šiluma šalinama gerokai paprasčiau. Ji tiekiama tiesiog ant lėkščių įrengiant šaldytuvus, pvz., gyvatukinius.

18 DALIS

DISTILIACIJA IR REKTIFIKACIJA

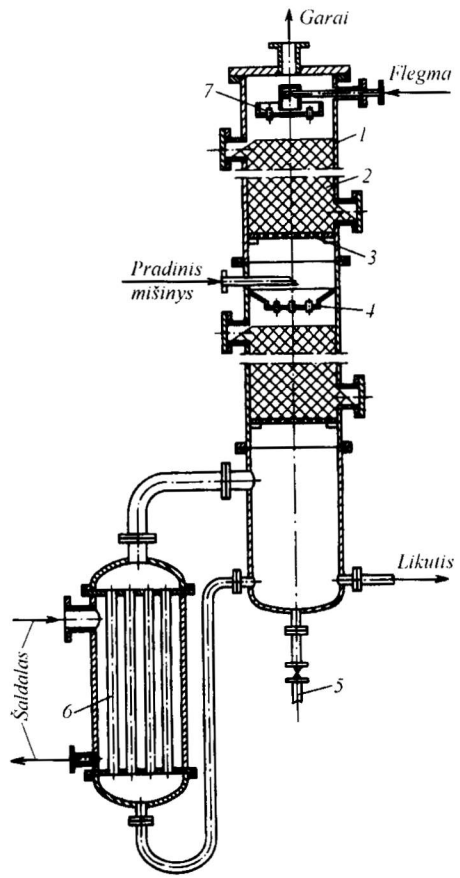
Distiliacija – tai masės mainų procesas, kurio metu perskiriami *skystų komponentų mišiniai*, juos kaitinant iki virimo temperatūros, o gautus garus po to kondensuojant. Po perskyrimo gaunamas kondensatas ir likutis, kurių sudėtis skiriasi nuo pradinio mišinio sudėties.

Rektifikacijos proceso metu *skystiems vienalyčiams (homogeniniams)* mišiniams arba tirpalams suskirstyti į komponentus arba komponentų grupes naudojama daugkartinė garų mišinio ir skysčio mišinio tarpusavio sąveika. Daug kartų garinant ir kondensuojant garus praktiškai pradinis mišinys perskiriamas į grynus komponentus. Distiliuojant ši sąveika yra vienkartinė. Procesas gali vykti, kai skirtingos yra tirpalo komponentų virimo temperatūros arba kai mišinį sudarančių komponentų garų slėgis, esant tai pačiai temperatūrai, yra skirtingas. Todėl garų, o po to ir jų kondensato sudėtis skirsis nuo pradinio mišinio sudėties. Pavyzdžiui, virinant dviejų komponentų tirpalą, žemesnės virimo temperatūros komponentas, sutrumpintai žymimas *ŽVK*, į garų fazę *V* pereis greičiau, negu tas tirpalo komponentas, kurio virimo temperatūra yra aukštesnė (sutrumpintai *AVK)*. Kondensavus šio tirpalo garus, gaunamas distiliatas *D*, kuriame *ŽVK* koncentracija yra didesnė, negu ji buvo pradiniame tirpale *M*. Virintuve likusiame neišgarintame tirpalo likutyje *K*, palyginti su pradiniu tirpalu *M*, bus padidėjusi *AVK* ir sumažėjusi *ŽVK* koncentracija.



Distiliacijos (*a*) ir rektifikacijos (*b*) schemos

Distiliacijos procesas yra panašus į garinimo procesą. Skirtumas tik tas, kad garinimo aparate kietosios fazės komponentai niekada nepereina į garų fazę. Distiliuojant į garų fazę, be *ŽVK*, pereina ir dalis *AVK*, todėl sunkiau gauti grynąjį komponentą.



18.1 pav. Įkrautinė rektifikacijos kolona su virintuvu:
1 – korpusas, *2* – įkrova, *3* – atraminis tinklelis, *4* – skysčio skirstytuvas, *5* – likučio virintuve išleidimo atvamzdis, *6* – virintuvas, *7* – drėkintuvas

Distiliacija ir rektifikacija naudojama chemijos, farmacijos, naftos perdirbimo, maisto ir kitose pramonės šakose perskiriant ir gryninant skysčius bei suskystintąsias dujas.

Distiliaciją skiriama į paprastąją distiliaciją (arba tiesiog distiliaciją), distiliaciją vandens garais ir molekulinę distiliaciją.

Paprastosios distiliacijos metu atliekamas vienkartinis pradinio mišinio išgarinimas ir susidariusių garų kondensacija. Dažniausiai paprasta distiliacija *ŽVK* atskiriamas nuo nedidelio *AVK* priemaišų kiekio.

Rektifikacijos procesą galima vykdyti aparate (pvz., įkrautinėje kolonoje), kuriame iš apačios į viršų juda garai (18.1 pav.), o iš viršaus priešpriešiais garams juda skystis, kuriame yra daugiau *ŽVK* negu garuose. Sąveikaujant garams ir flegmai garai iš dalies kondensuojasi, o skystis (flegma) dėl kondensacijos metu išsiskyrusios šilumos iš dalies išgaruoja. Kondensuojasi lengviau *AVK*, o išgaruoja *ŽVK*. Todėl iš kolonos ištekančius garus sudaro beveik grynas *ŽVK*. Iš kolonos garai tiekiami į šilumokaitį-aušintuvą, vadinamą deflegmatoriumi (18.1 pav. jis nepavaizduotas), po deflegmatoriaus skystis skiriamas į dvi dalis: viena, vadinama distiliatu, sudaro rektifikacijos produktą, o kita dalis, vadinama flegma, grąžinama į koloną. Iš apatinės kolonos dalies ištekantis skystis vadinamas virintuvo likučiu. Kolonos *1* apačioje kylančių garų srautui sudaryti įrengtas virintuvas *6*.

Rektifikuojama lėkštinėse, taip pat įkrautinėse arba plėvelinėse rektifikacijos kolonose, kurios iš principo nesiskiria nuo absorberių. Kai kurie jų skirtumai bus paminėti toliau.

18.1. Skysčio ir garų sistemų pusiausvyra

Skystų komponentų mišinį dažniausiai sudaro keli komponentai, paprasčiausiu atveju – du, pvz., *A* ir *B*. Tokie mišiniai vadinami binariniais. Mišinio elgsena ir savybės priklauso nuo jį sudarančių komponentų cheminės kilmės ir slėgio.

Idealiems tirpalams būdinga tai, kad sąveikos jėga tarp to paties komponento ir skirtingų komponentų molekulių yra vienoda. Tokiu atveju bendra jėga, kuri sulaiko molekules mišinyje, nepriklauso nuo mišinio sudėties. Dalinis slėgis šiuo atveju priklauso tik nuo skaičiaus molekulių, per laiko vienetą (pvz., sekundę) pasiekiančių skysčio paviršių tokiu greičiu, kuris reikalingas molekulių vidinės traukos jėgoms nugalėti. Todėl konkretaus komponento dalinį slėgį, esant nustatytai temperatūrai ir komponento koncentracijai mišinyje, pagal Raulio dėsnį galima apskaičiuotas taip:

$$p_A = P_A \cdot x_A \qquad (18.1)$$

ir $$p_B = P_B \cdot (1 - x_A). \qquad (18.1a)$$

Raulio dėsnis tinka ir dujoms, kai jų temperatūra žemesnė už kritinę (t. y. tokią temperatūrą, kurią viršijus dujos slegiamos nesuskystėja).

Pagal tai, kaip komponentai tirpsta vieni kituose, skysčių mišiniai arba tirpalai skirstomi į sudarytus iš vienas kitame: a) gerai tirpstančių skysčių, b) iš dalies tirpstančių skysčių, c) netirpstančių skysčių.

Distiliacijos ir rektifikacijos būdu perskiriami vienas kitame gerai tirpstančių komponentų mišiniai arba tirpalai. Šie tirpalai skirstomi į idealius tirpalus, kuriems galioja Raulio dėsnis, ir normalius tirpalus – mišinius, kurių eksperimentiškai nustatytos fizikinės cheminės savybės tik iš dalies skiriasi nuo tyrimo sąlygomis apskaičiuotų pagal Raulio dėsnį. Pastarieji nesudaro pastovioje temperatūroje verdančių mišinių (azeotropų).

Dar yra ir neidealių tirpalų – skysčių, gerokai nukrypstančių nuo Raulio dėsnio (tarp jų ir mišinių, verdančių pastovioje temperatūroje, arba azeotropų). Realiai tarpusavyje netirpių skysčių nėra – visi skysčiai, kad ir nedideliais kiekiais, vieni kituose tirpsta. Patogumo dėlei šie skysčiai pavadinti tarpusavyje netirpiais.

Dviejų tarpusavyje tirpių skysčių mišinys yra sistema, sudaryta iš dviejų fazių ir dviejų komponentų. Pagal fazių taisyklę (2 dalis) tokia sistema turi du laisvės laipsnius: $C = K - F + 2 = 2 - 2 + 2 = 2$.

Laisvės laipsniai gali būti slėgis P, temperatūra t ir koncentracija x. Skaičiuojant ir tiriant distiliaciją, pastovia laikoma tik vieno kintamojo vertė ir fazių diagrama sudaroma plokštuminėje koordinačių sistemoje. Galimos tokios fazių diagramos: P–t ($x = const$), P–x ($t = const$), t–x ($P = const$).

Technologiniams skaičiavimams svarbiausia yra diagrama t–x, (y), kadangi distiliacijos procesai pramoniniuose aparatuose dažniausiai vykdomi esant pastoviam slėgiui, t. y. izobarinėmis sąlygomis. Tokioje diagramoje (18.2 pav.) ant abscisės atidedamos įvairias temperatūras atitinkančios koncentracijos skystojoje fazėje x ir garų fazėje y.

Pagal Daltono dėsnį $p_A = P_A \cdot y_A^*$ ir įvertinus (18.1) lygtį,

$$y_A^* = p_A / P = (P_A / P) \cdot x_A , \qquad (18.2)$$

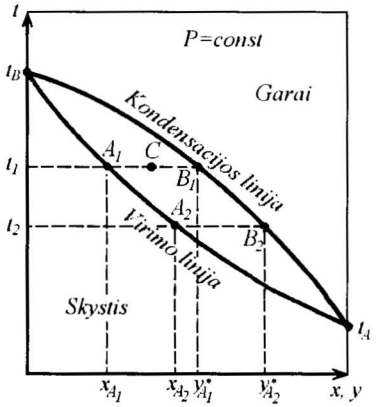
tačiau

$$P = p_A + p_B = P_A \cdot x_A + P_B \cdot (1 - x_A) = P_B + (P_A - P_B) \cdot x_A . \qquad (18.3)$$

Tada $x_A = (P - P_B)/(P_A - P_B)$; (18.4)

čia P – bendras slėgis; P_A ir P_B – komponentų A ir B sočiųjų garų slėgis; p_A ir p_B – dalinis komponento A ir B garų slėgis; x_A – komponento A koncentracija skystyje; y_A^* – komponento A koncentracija garuose, pusiausviruose su skysčiu, kuriame komponento A koncentracija x_A.

(18.4) lygtis nustato ryšį tarp žinomų slėgių P, P_A bei P_B ir koncentracijų skystyje.



18.2 pav. Fazinė diagrama *t–x, y*

Naudojant (18.4) lygtį, pagal žinomas P_A ir P_B vertes, esant temperatūroms t_1, t_2 ir t. t., apskaičiuojamos x_{A1}, x_{A2} ir t. t. vertės, o po to pagal (18.2) lygtį – atitinkamos y^*_{A1}, y_{A2} ir t. t. vertės. Naudojant apskaičiuotas koordinates, per atitinkamus taškus brėžiama vadinamoji skysčio virimo linija (kreivė $t_A A_2 A_1 t_B$) ir garų kondensacijos linija (kreivė $t_A B_2 B_1 t_B$). Atkarpos A_1B_1, A_2B_2 ir t. t. yra izotermos, jungiančios pusiausviras skysčio ir garų sudėtis.

Kreivės $t_A A_2 A_1 t_B$ taškai atitinka virimo temperatūros skysčio sudėtį. Visi taškai, esantys žemiau šios kreivės, atitinka tik iš skysčio sudarytą sistemą. Analogiškai visi virš kreivės $t_A B_2 B_1 t_B$ esantys taškai apibūdina sistemą, kurios temperatūra aukštesnė už garų kondensacijos pradžios temperatūrą, t. y. šiuose taškuose garai yra perkaitinti ir sistemą sudaro tik garai. Tarp kondensacijos ir virimo kreivių esantys taškai (pvz., 18.2 pav., taškas *C*) apibūdina sistemas, kurių temperatūra aukštesnė už tiriamos sudėties skysčio virimo temperatūrą ir žemesnė už nustatytos koncentracijos garų kondensacijos temperatūrą. Taigi šie taškai atitinka garų ir skysčio sistemų pusiausvyrą.

Pagrindiniai fazių pusiausvyros dėsningumai buvo nagrinėti pirmosios knygos antroje dalyje. Buvo išvesta idealių mišinių pusiausvyros liniją aprašanti lygtis (2.20):

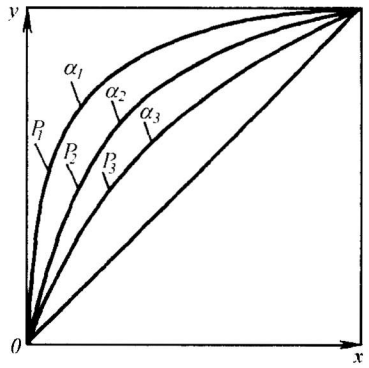
$$y^*_A = \alpha \cdot x_A / \left[1 + x_A \cdot (\alpha - 1)\right];$$

čia $\alpha = P_A / P_B$ – santykinis komponento *A* lakumas (α dar vadinamas perskyrimo koeficientu).

Šią lygtį galima panaudoti skaičiuojant sistemas, nedaug besiskiriančias nuo idealių, pvz., tiriant vienos homologinės eilės skysčių mišinius. Kadangi komponentų *A* ir *B* sočiųjų garų slėgis gali keistis jų virimo temperatūrų intervale (t. y. nuo t_A iki t_B), tai skaičiavimams supaprastinti į minėtą lygtį įrašomas santykinio lakumo verčių geometrinis vidurkis:

$$\alpha = (\alpha_1 \cdot \alpha_2)^{0.5}; \qquad (18.5)$$

čia α_1 ir α_2 – santykiniai lakumai, esant temperatūroms t_A ir t_B.



18.3 pav. Fazinė diagrama *y–x*, esant skirtingiems slėgiams virš skysčio

Santykinis lakumas α, mažėjant temperatūrai, didėja. Kadangi virimo temperatūra, mažėjant slėgiui, mažėja, tai santykinis lakumas α didėja. Kaip parodyta 18.3 pav., kai $\alpha_3 > \alpha_2 > \alpha_1$, tai $P_1 > P_2 > P_3$. Ši savybė panaudojama perskiriant artimų virimo temperatūrų komponentus, kurių α mažas. Pusiausviros kreivės ir įstrižainė (18.3 pav.) riboja dviejų fazių – garų ir skysčio egzistavimo sritį.

Jeigu idealus mišinys sudarytas iš keleto komponentų, tai (2.20) lygties tipo lygtys tokiems mišiniams gali būti užrašytos pagal analogiją su binariniais mišiniais. Kai mišiniai sudaryti iš n komponentų, pvz., A, B, C ir D, pagal Raulio ir Daltono dėsnius

$$y_A = (p_A/P)\cdot x_A;\ y_B = (p_B/P)\cdot x_B;$$
$$y_C = (p_C/P)\cdot x_C;\ y_D = (p_D/P)\cdot x_D. \qquad (18.6)$$

Kadangi

$$P = P_A\cdot x_A + P_B\cdot x_B + P_C\cdot x_C + P_D\cdot x_D + ... = \sum_{i=1}^{i=n} P_i\cdot x_i, \qquad (18.7)$$

tai bet kuriam j-ajam komponentui

$$y_j = P_j\cdot x_j \Big/ \sum_{i=1}^{i=n} P_i\cdot x_i. \qquad (18.8)$$

(18.8) lygties dešiniosios pusės skaitiklį ir vardiklį padalijus iš P_A gaunama:

$$y_j = \alpha_j\cdot x_j \Big/ \sum_{i=1}^{i=n} \alpha_i\cdot x_i; \qquad (18.9)$$

čia $\alpha_A = P_A/P_B$; $\alpha_B = P_B/P_A$; $\alpha_C = P_C/P_A$ ir t. t.

Pavyzdžiui, sočiųjų garų slėgio priklausomybė nuo temperatūros gerai aprašoma empirine Antuano lygtimi:

$$\ln P_A = A - B/(T + C); \qquad (18.10)$$

čia A – nuo temperatūros priklausantis koeficientas; B ir C – žinynuose parenkamos konstantos; T – absoliučioji temperatūra.

Ši (18.10) lygtis aprašo garų slėgio priklausomybę nuo temperatūros, kai temperatūrų intervalas iki kelių dešimčių laipsnių, o slėgiai nelabai artimi kritiniams.

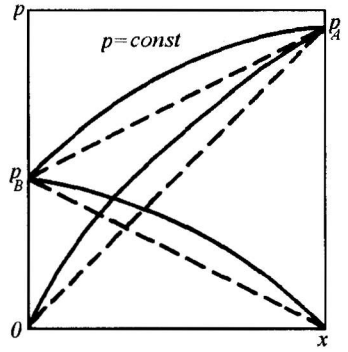
Realių procesų metu apdorojamos neidealios sistemos, kurių elgsena neatitinka Raulio dėsnio. Maišant neidealias sistemas, keičiasi jų tūris, išsiskiria šiluma, o slėgiams padidėjus garų molekulės pastebimai tarpusavyje sąveikauja. Šiais atvejais fazių diagramų linijos skiriasi nuo nagrinėtų 18.2 ir 18.3 pav. Joms aprašyti nagrinėtosios lygtys netinka. Todėl sudaromos lygtys pagal žinynuose pateiktus arba eksperimentinius duomenis.

Tiek idealių, tiek realių sistemų kreivių tarpusavio išsidėstymas fazinėse *t–x, y* ir *y–x* diagramose gali būti apibūdinamos Konovalovo dėsniais. Konovalovo dėsniai nusako ryšį tarp dvifazių sistemų sudėties, slėgio ir temperatūros kitimo.

Pirmasis Konovalovo dėsnis formuluojamas taip: garuose yra daugiau to komponento, kurio pridėjus į skystį padidėja garų slėgis virš jo arba sumažėja jo virimo temperatūra. Garuose *ŽVK* visada būna daugiau negu su jais pusiausvirame skystyje.

Pirmasis Konovalovo dėsnis papildomas pirmąja Vrevskio taisykle, nusakančia temperatūros įtaką pusiausvirųjų fazių sudėtims: didėjant binarinių mišinių temperatūrai, garuose didėja santykinis kiekis to komponento, kurio dalinė molinė garavimo šiluma didesnė.

Tai galima pademonstruoti, naudojantis 18.2 pav. pateikta diagrama. Esant tai pačiai temperatūrai *ŽVK* koncentracija idealių sistemų garuose $y^*_{A_1}$ (taškas B_1) didesnė už su jais pusiausviro skysčio koncentraciją x_{A_1} (taškas A_1). Pridėjus į mišinį *ŽVK*, jo virimo temperatūra sumažėja, bet *ŽVK* kiekis garuose išlieka didesnis negu skystyje.



18.4 pav. Teigiamojo nukrypimo nuo Raulio dėsnio mišinių diagrama

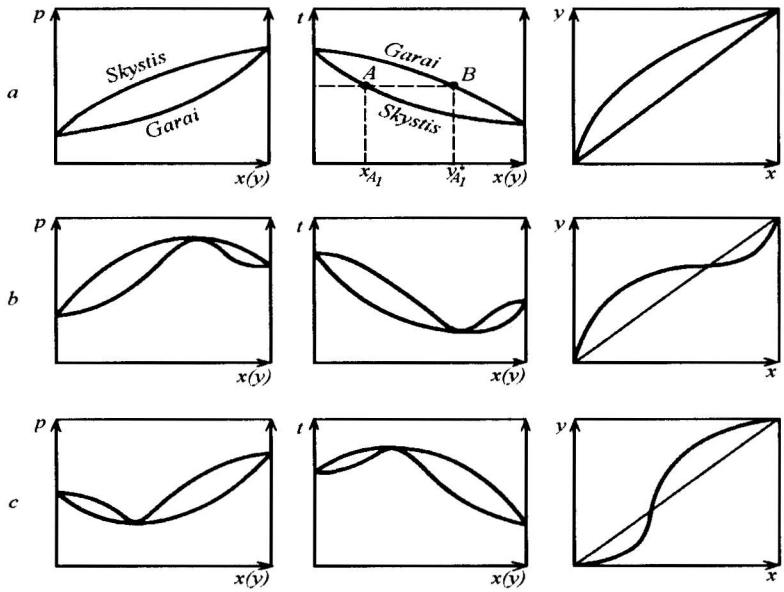
Skaičiuojant realius skysčius gaunami rezultatai dažnai gerokai skiriasi nuo gaunamų pagal Raulio dėsnį. Jeigu pilnutinio garų slėgio (arba dalinių slėgių sumos) priklausomybės nuo skysto mišinio sudėties linija (18.4 pav. ištisinė linija) yra aukščiau linijos, apibūdinančios tas pačias idealių mišinių priklausomybes (punktyrinė linija), tai toks nukrypimas vadinamas teigiamuoju nukrypimu nuo Raulio dėsnio, jeigu žemiau – neigiamuoju. Šie nukrypimai nusakomi skysčio molekulių aktyvumo pasikeitimu, disociacija, hidratacija ir kt.

Realios sistemos nukrypimas nuo Raulio dėsnio išreiškiamas aktyvumo koeficiento γ verte (žr. 2 dalį):

$$p_A = P_A \cdot x_A \cdot \gamma \,. \qquad (18.11)$$

Teigiamojo nukrypimo nuo Raulio dėsnio mišiniams $\gamma > 1$, o neigiamojo – $\gamma < 1$. Aktyvumo koeficientas γ yra sunkiai nustatomas dydis, todėl y–x diagrama sudaroma pagal bandymų arba žinynų duomenis.

Daugelio realių mišinių nukrypimas nuo Raulio dėsnio yra toks ryškus, kad jų fazinėse diagramose p–x ir t–x atsiranda santykinis maksimumas arba minimumas (18.5 pav., *b, c*). Šiais atvejais ekstremumo taškuose pusiausvirųjų fazių sudėtys vienodos, todėl skysčio ir garų kreivės susiliečia viena su kita. Tokie mišiniai vadinami *azeotropiniais mišiniais*, arba *azeotropais*. Pagrindinė azeotropų savybė ta, kad garuojant jų sudėtis nesikeičia, todėl tokiems mišiniams perskirti reikalingi specialūs rektifikacijos būdai (pvz., azeotropinė arba ekstrakcinė rektifikacija), slėgio pakeitimas ir kt.



18.5 pav. Pusiausvirų skysčio ir garų fazių diagrama: idealios (*a*) ir realios (*b, c*) sistemų

Dėl šios azeotropinių mišinių savybės antrasis Konovalovo dėsnis papildomas tokiu postulatu: jeigu slėgis ir temperatūra, esant dviem binarinėms fazėms, turi ekstremumą (maksimumą arba minimumą), tai tokių fazių sudėtis

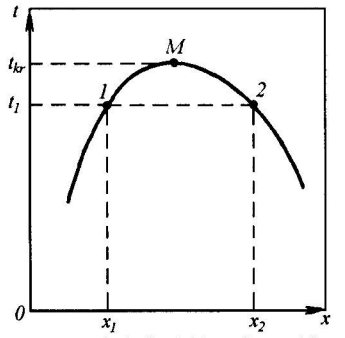
vienoda. Tai tinka bet kokios kilmės sistemoms. Skysčio ir garų sistemoms antrasis Konovalovo dėsnis nustato pagrindinę azeotropų savybę.

Keičiantis išorinėms sąlygoms (temperatūrai arba slėgiui), skirtingose azeotropinio taško pusėse α vertė keičiasi skirtingai: viena „žuvytės" (18.5 pav., *b, c*) pusė paplatėja, kita – susiaurėja. Suprantama, kad diagramos dalyje, kur garuose mažesnės garavimo šilumos komponento yra daugiau negu jo yra tirpale, mažėjant temperatūrai (slėgiui), šio komponento kiekis tirpale didėja.

Azeotropų sudėties pasislinkimas, kintant išorinėms sąlygoms, nusakomas antruoju Vrevskio dėsniu: jeigu skysčio ir garų sistemos slėgis (temperatūra) turi maksimumą, padidėjus temperatūrai, azeotropiniame mišinyje padidėja koncentracija to komponento, kurio dalinė molinė garavimo šiluma didesnė, o jeigu skysčio ir garų sistemos slėgis (temperatūra) turi minimumą, tai, didėjant temperatūrai, azeotrope didėja mažesnės garavimo šilumos komponento koncentracija. Jis nusako azeotropinio mišinio perskyrimo galimybę, distiliacijos metu keičiant slėgį. Taigi, skiriant mišinius, azeotropo taškas y–x diagramoje pasislenka ir iš principo gali sutapti, pvz., su diagramos dešiniuoju viršutiniu kampu. Tai leidžia azeotropą perskirti distiliuojant.

Taigi Konovalovo dėsniai apibūdina binarinių dvifazių sistemų pusiausvirosios būsenos kitimą izobarinėmis arba izoterminėmis sąlygomis. Vrevskio dėsniai nusako temperatūros ir slėgio kitimo įtakos fazinei binarinių sistemų pusiausvyrai dėsningumus.

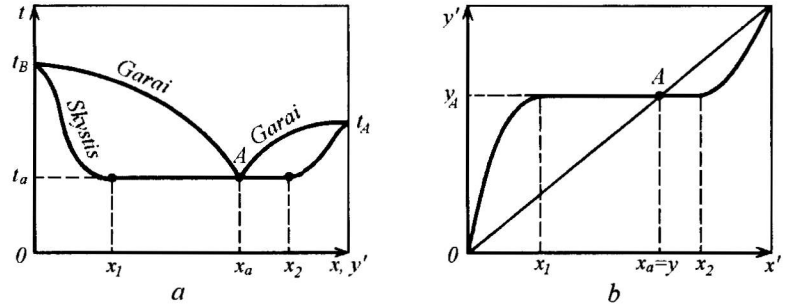
Nagrinėjant iš dalies tirpių skysčių fazinę pusiausvyrą, reikia atkreipti dėmesį į tai, kad jų tarpusavio tirpumas iš esmės priklauso nuo mišinių sudėties ir temperatūros. Paprastai, didėjant temperatūrai, tirpumas didėja.



18.6 pav. Dviejų iš dalies vienas kitame tirpių skysčių tirpumo kreivė

Tipinė dviejų iš dalies tirpių skysčių tirpumo kreivė pavaizduota 18.6 pav. Jeigu pasirinkta temperatūra t_1, tai koncentracijų srityse $x < x_1$ ir $x > x_2$ susidaro homogeninė sistema, kurioje skysčiai vienas kitame visiškai ištirpsta. Tokioms sistemoms galioja Raulio dėsnis. Koncentracijų intervale nuo x_1 iki x_2 susidaro du vienas kitame netirpūs skysčiai. Vieno iš jų koncentracija lygi x_1, kito – x_2. Pusiausvira su skysčiais yra atitinkamos sudėties garų fazė.

Kai temperatūros aukštesnės už kritinę t_{kr} (aukščiau už tašką *M*), maišant skysčius bet kokiais santykiais, susidaro homogeninis tirpalas. Šiuo atveju garų fazės koncentracija priklausys nuo skystosios fazės sudėties.



18.7 pav. Sistemų su ribotai tarpusavyje tirpstančiais komponentais fazinės pusiausvyros diagramos (*a, b*)

Jeigu garai su skysčiais, kurių sudėtis x_1 ir x_2, yra pusiausviri, tai garų sudėtis bus intervale $x_1 < y < x_2$ ir, esant skysčio koncentracijai x_a, būtinai susidarys azeotropas (18.7 pav.). Kintant komponento koncentracijai skystyje nuo *0* iki x_1, skysčio virimo temperatūra kinta nuo *AVK* virimo temperatūros t_B iki azeotropo virimo temperatūros t_a. *ŽVK* koncentracija pusiausviruosiuose garuose keisis nuo *0* iki $y_a = x_a$. Kaip buvo anksčiau minėta, *ŽVK* koncentracijų intervale nuo x_1 iki x_2 susidaro du vienas kitame netirpūs skysčio sluoksniai, kuriuose *ŽVK* koncentracija atitinkamai lygi x_1 ir x_2. Skysčių virimo temperatūra yra t_a. Kai *ŽVK* koncentracijos vertė didesnė kaip x_2, susidaro homogeninis tirpalas, todėl virimo temperatūra padidėja nuo t_a iki t_A ir kartu padidėja *ŽVK* koncentracija pusiausviruosiuose garuose. 18.7 paveikslo *b* dalyje pavaizduota panašių sistemų y'–x' diagrama.

18.2. Distiliacija

Paprastoji distiliacija, arba tiesiog distiliacija, dažniausiai yra periodinis procesas, nors ji gali būti ir nuolatinė.

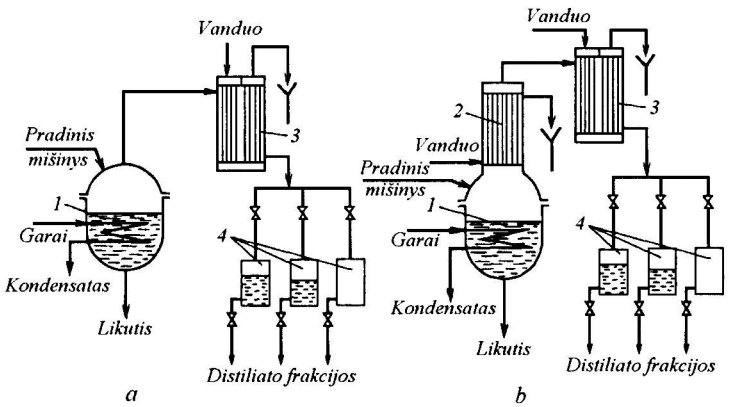
Periodiškai distiliuojant, iki virimo temperatūros šildomas skystis pamažu garuoja, susidarę garai nepertraukiamai šalinami iš sistemos ir kondensuojasi; gaunamas distiliatas. Tokios distiliacijos metu *ŽVK* kiekis virintuvo likutyje arba pradiniame mišinyje mažėja, todėl *ŽVK* kiekis mažėja ir distiliate. Proceso arba jo atskiro ciklo pradžioje gaunamas maksimalios, o pabaigoje – minimalios *ŽVK* koncentracijos distiliatas.

Paprastąją distiliaciją galima vykdyti esant atmosferos slėgiui virintuve, sudarant viršslėgį arba vakuumą.

Surenkant distiliatą tam tikrais periodais, gaunamos skirtingos sudėties frakcijos. Šios rūšies *distiliacija vadinama frakcine* (18.8 pav.).

Pradinis mišinys supilamas į virintuvą *1*, kuriame tirpalui pašildyti ir virinti įrengtas sočiaisiais vandens garais šildomas gyvatukas. Virintuve susida-

rę garai kondensuojami šilumokaityje-kondensatoriuje *3*, jame taip pat iki nurodytos temperatūros ataušinamas distiliatas, kuris patenka į vieną iš rinktuvų *4*. Pabaigus distiliacijos procesą, likutis išleidžiamas iš virintuvo ir, įpylus naują pradinio mišinio porciją, distiliacija kartojama.



18.8 pav. Distiliacijos proceso schemos:
a – distiliacija be deflegmacijos, *b* – distiliacija su deflegmacija;
1 – virintuvas, *2* – deflegmatorius, *3* – kondensatorius, *4* – distiliato rinktuvai

Paprastosios distiliacijos metu susidarę garai išteka iš aparato. Tariame, kad kiekvienu laiko momentu garai yra pusiausviri su virintuve pasiliekančiu skysčiu. Paprastosios distiliacijos medžiagų balansui sudaryti laikome, kad tam tikru laiko momentu aparate esančio skysčio kiekis lygus L, o *ŽVK* koncentracija jame yra x. Virš skysčio esančiuose su juo pusiausviruose garuose *ŽVK* koncentracija yra y^*. Tada virš skysčio esančių garų sudėtį galima išreikšti kaip skysčio sudėties funkciją, t. y. $y^* = f(x)$. Po be galo mažos trukmės $d\tau$ skysčio kiekis pasikeičia dydžiu dL, o *ŽVK* koncentracija jame – dx. Atitinkamai jie tampa lygūs $L - dL$ ir $x - dx$. Per trukmę $d\tau$ susidaręs garų kiekis lygus skysčio kiekio sumažėjimui dL, o jų koncentracija y^* yra pusiausvira su x. *ŽVK* kiekis skystyje prieš $d\tau$ lygus $L \cdot x$, o jos pabaigoje $(L - dL)\cdot(x - dx)$. Į garus per trukmę $d\tau$ perėjo $dL \cdot y^*$ *ŽVK* kiekis. Taigi medžiagų balanso per trukmę $d\tau$ pagal *ŽVK* lygtis tokia:

$$L \cdot x = (L - dL)\cdot(x - dx) + dL \cdot y^* = L \cdot x - dL \cdot x + dL \cdot dx + dL \cdot y^* . \tag{18.12}$$

Dydis $dL \cdot dx$, kaip be galo mažas dydis, prilyginamas nuliui. Tada (18.12) lygtį po pertvarkymo užrašome taip:

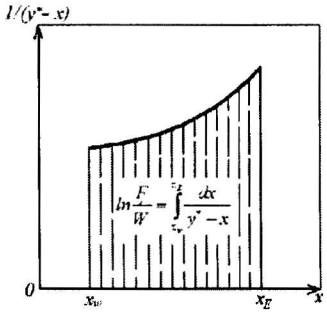
$$dL/L = dx/(y^* - x).$$

Suintegravę šią lygtį nuo x_M iki x_K ir nuo $L = M$ iki $L = K$, gauname:

$$\int_K^M (dL/L) = \int_{x_K}^{x_M} \left[dx/(y^* - x)\right] \text{ ir } ln(M/K) = \int_{x_K}^{x_M} \left[dx/(y^* - x)\right]; \quad (18.13)$$

čia M – pradinio mišinio kiekis, x_M – jo koncentracija; K – likučio virintuve kiekis, x_K – jo koncentracija.

(18.13) lygtyje funkcija $y^* = f(x)$ išreiškiama pusiausvyros kreive, kuri yra specifinė kiekvienai skysčio ir garų sistemai. Todėl (18.13) lygtis sprendžiama grafiškai sudarant priklausomybę $1/(y^* - x) = f(x)$. Pagal keletą x verčių iš $x_M - x_K$ intervalo, parinktų žinyne arba y–x diagramoje (kai turime analitinę lygtį nusakančią priklausomybę $y^* = f(x)$; y^* vertes galima apskaičiuoti), apskaičiuojamos (18.13) lygties integralo vertės.



18.9 pav. Likučio virintuve nustatymas paprastąja distiliacija

Gautas distiliato kiekis apskaičiuojamas kaip pradinio mišinio ir likučio virintuve skirtumas: $D=M-K$. K vertė, žinant M, x_M ir pasirinkus x_K vertę, nustatoma iš (18.13) lygties ir 18.9 pav.

Vidutinė gauto distiliato sudėtis $x_{D_{vid}}$ apskaičiuojama, naudojant medžiagų balanso pagal *ŽVK* lygtį:

$$M \cdot x_M = K \cdot x_K + (M - K) \cdot x_{D_{vid}}; \quad (18.14)$$

tada $$x_{D_{vid}} = (M \cdot x_M - K \cdot x_K)/(M - K). \quad (18.15)$$

Skaičiuojant paprastąją distiliaciją, nustatomas distiliato kiekis, jo vidutinė ir likučio virintuve sudėtis. Komponentų išgryninimo arba mišinio perskyrimo laipsnis paprastosios distiliacijos metu padidinamas, naudojant garų deflegmaciją (18.8 pav., *b*).

Šiuo atveju garai iš virintuvo *1* patenka į deflegmatorių *2*, kuriame jie iš dalies kondensuojasi. Lengviau kondensuojasi *AVK*, o garai prisisodrina *ŽVK*. Deflegmatoriuje susidaręs kondensatas, vadinamas flegma, grįžta į distiliatoriaus virintuvą ir yra pakartotinai garinamas, o deflegmatoriuje nesusikondensavę garai patenka į kondensatorių *3*, kuriame visiškai kondensuojasi. Iš kondensatoriaus kondensatas-distiliatas patenka į rinktuvus *4*.

Distiliacija vandens garais. Kai yra sumaišyti du tarpusavyje netirpūs skysčiai, kiekvienas iš jų išlaiko visas savo savybes. Toks mišinys nusodinant lengvai perskiriamas į komponentus. Sistema, sudaryta iš dviejų komponentų ir trijų fazių (du skysčiai ir garai), turi vieną laisvės laipsnį:

$$C = K - F + 2 = 2 - 3 + 2 = 1 .$$

Tai rodo, kad kiekvieną nurodytą mišinio virimo temperatūrą atitinka visiškai apibrėžtas slėgis. Kiekvienas mišinio komponentas elgsis taip, tarsi jis būtų grynas. Kiekvieno komponento dalinis slėgis nepriklauso nuo jo koncentracijos mišinyje ir lygus gryno komponento garų slėgiui toje temperatūroje. Mišinio virimo temperatūra nepriklauso nuo mišinio sudėties:

$$p_A = P_A , \quad p_B = P_B \quad \text{ir} \quad P = p_A + p_B = P_A + P_B .$$

Tokio mišinio virimo temperatūra visada žemesnė už grynų komponentų virimo temperatūras ir yra pastovi, esant net labai mažiems antrojo komponento kiekiams. Pašalinus iš mišinio antrąjį komponentą, mišinio temperatūra šuoliškai padidėja iki skystojoje fazėje likusio komponento virimo temperatūros. Iki šio momento viename kubiniame metre virš mišinio esančių garų yra toks kiekvieno komponento kiekis, koks jame būtų, esant tai pačiai temperatūrai, jei kiekvieno komponento būtų po lygiai.

Jeigu į skystį, nesimaišantį su vandeniu, įpiltume vandens, gauto mišinio virimo temperatūra, esant virš jo atmosferos slėgiui, būtų žemesnė negu 100 °C. Kadangi nepriklausomai nuo temperatūros $P = P_A + P_B$, todėl, esant normaliam slėgiui P_{norm}, $P_B = P - P_A < P$, t. y. $P_B < P_{norm}$, o sočiųjų vandens garų, kurių slėgis mažesnis už P_{norm}, temperatūra žemesnė už 100 °C. Šios priklausomybės išlieka ir esant kitiems slėgiams. Virimo temperatūra paprastai nustatoma pagal garų slėgio kreives. Distiliacija vandens garais paprastai atliekama virintuvuose *1*, turinčiuose vandens garų pripildomą apvalkalinį šilumokaitį. Virintuvo viduje įrengtas barboteris, per kurį tiekiami vandens garai (18.10 pav.).

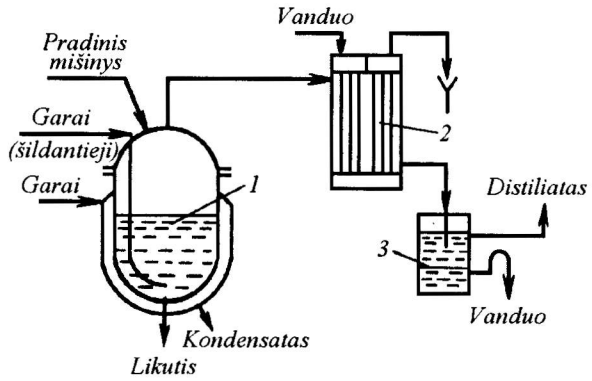
Teorinės vandens garų sąnaudos distiliacijai vandens garais G_B nustatomos iš priklausomybės

$$y_A = p_A/P = P_A/P , \quad y_B = p_B/P = P_B/P .$$

Kadangi temperatūra pastovi, tai ir sočiųjų garų slėgiai pastovūs. Komponentų A ir B kiekių G_A ir G_B santykis:

$$\begin{aligned} G_A/G_B &= y_A \cdot M_A/(y_B \cdot M_B) = \\ &= P_A \cdot M_A/(P_B \cdot M_B) = P_A \cdot M_A/[(P - P_A) \cdot M_B]; \end{aligned} \qquad (18.16)$$

čia M_A ir M_B – komponentų A ir B molekulinės masės.



18.10 pav. Distiliacijos vandens garais schema:
1 – virintuvas, *2* – kondensatorius, *3* – nusodintuvas

Pagal (18.16) lygtį apskaičiuojamos tiesiogiai tiekiamų garų sąnaudos vienam kilogramui distiliuojamo komponento iš mišinio gauti:

$$G_V = P_B \cdot M_B / (P_A \cdot M_A). \qquad (18.17)$$

Iš distiliatoriaus ištekantys vandens garai nėra visiškai prisotinti distiliuojamo komponento garų, todėl garų sąnaudos būna didesnės už apskaičiuotas pagal (18.17) lygtį:

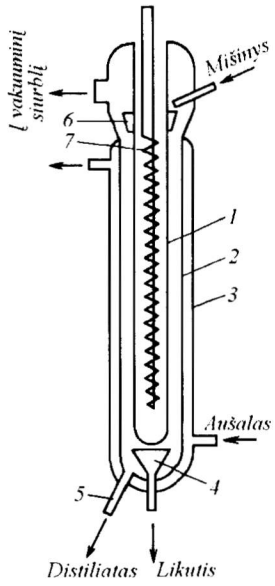
$$G_V = P_B \cdot M_B / (P_A \cdot M_A) \cdot \varphi; \qquad (18.18)$$

čia φ – prisotinimo koeficientas, $\varphi < 1$.

(18.18) lygtyje neįvertinama mišiniui pašildyti ir išgarinti reikalingos garų sąnaudos. Šilumos sąnaudos, distiliuojant garais, tomis pačiomis sąlygomis didesnės nei paprastai distiliuojant tuo šilumos kiekiu, kurį išneša garai. Vandens garais distiliuojama tada, kai reikia išskirti iš palyginti nelakaus komponento terpės lakius komponentus, kurie, esant kambario temperatūrai, nesimaišo su vandeniu.

Kai kada pagal analogišką principą atliekama distiliacija inertinėmis dujomis (azotu, anglies dioksidu ir kt.). Distiliacija inertinėmis dujomis sudėtingesnė už distiliaciją garais ir jos metu sumažėja šilumos atidavimo koeficientas kondensatoriuje. Šios distiliacijos metu nemažai atskirto komponento netenkama su inertinių dujų srautu.

Molekulinė distiliacija. Molekulinė distiliacija naudojama gana aukštos virimo temperatūros termiškai neatspariems mišiniams perskirti. Procesas atliekamas temperatūrose, žemesnėse už perskiriamojo mišinio temperatūrą, dideliame vakuume (absoliutusis slėgis nuo 10^2 iki 10^3 Pa). Tokiomis sąly-



18.11 pav. Vienos pakopos molekulinės distiliacijos aparato schema: *1* – garintuvas, *2* – kondensatorius, 3 – apvalkalas, *4, 5* – virintuvo likučio ir distiliato išleidimo atvamzdžiai, *6* – pradinio mišinio plėvelės skirstytuvas, *7* – kaitintuvas

gomis garų tankis labai sumažėja, o molekulių laisvo judėjimo kelias gerokai pailgėja. Jeigu atstumas tarp garavimo ir kondensavimo paviršių trumpesnis už laisvo judėjimo kelią, tai nuo garavimo paviršiaus atitrūkusios *ŽVK* molekulės patenka tiesiog ant kondensavimo paviršiaus ir čia pasilieka. Taigi garų ir skysčio tarpusavio pusiausvyra nenusistovi, kadangi susidarę garai tuojau pat pasišalina nuo garavimo paviršiaus.

Susidaręs kondensatas-distiliatas pasišalina iš aparato (18.11 pav.) pro antgalį *5*, o virintuvo likutis – pro piltuvą *4*.

Atstumas tarp garavimo ir kondensavimo paviršių būna nuo 20 iki 30 mm, jų temperatūra turi skirtis ne mažiau kaip 100 °C.

Binariniam mišiniui iš *A* ir *B* komponentų perskirti naudojamų garų sudėtis priklauso nuo komponentų garavimo greičio ir išreiškiama perskyrimo koeficientu α_M:

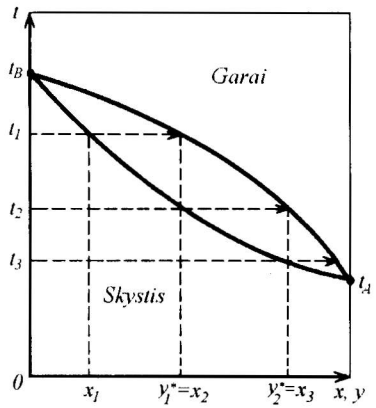
$$\alpha_M = (P_A / P_B) \cdot (M_B / M_A)^{0,5}; \qquad (18.19)$$

čia M_A ir M_B – komponentų *A* ir *B* molekulinės masės.

(18.19) lygtis rodo, kad molekulinės distiliacijos metu perskyrimo laipsnis būna $(M_B / M_A)^{0,5}$ kartų didesnis negu paprastosios distiliacijos metu. Molekulinės distiliacijos procesas brangus, todėl naudojamas tik nedideliems mišinių kiekiams perskirti.

18.3. Nuolatinė rektifikacija

Kaip buvo minėta, rektifikacija yra skysčių tirpalų ir mišinių perskyrimo procesas, kai tuo pačiu momentu skysčio ir garų fazių sąlyčio paviršiuje perskiriamasis mišinys daug kartų išgaruoja ir kondensuojasi. Rektifikacijos procese vykstantys virsmai vaizduojami t–x, y diagramose (18.12 pav.).



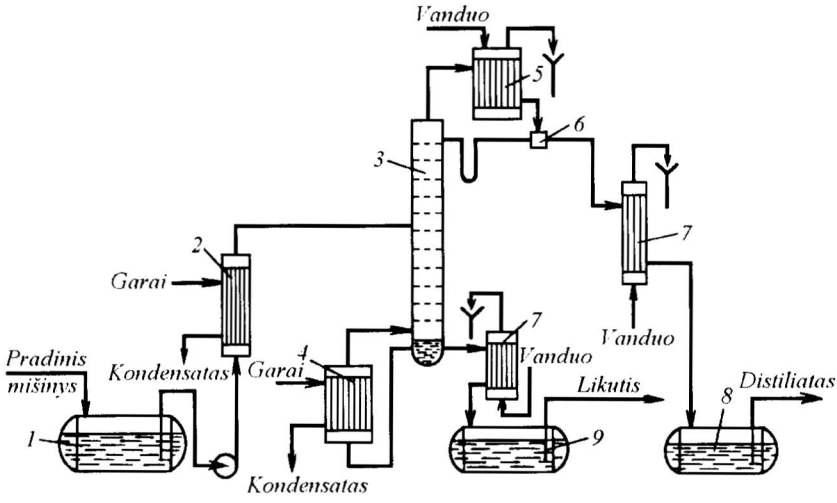
18.12 pav. Fazių diagrama t–x, y

Šildant pradinį mišinį, kuriame *ŽVK* koncentracija yra x_1, iki jo virimo temperatūros t_1, gaunami su skysčiu pusiausviri garai. Kondensuojant šiuos garus gaunamas kondensatas, kuriame *ŽVK* koncentracija $y_1^* = x_2$. Kondensate *ŽVK* būna daugiau negu pradiniame mišinyje. Šildant kondensatą iki jo virimo temperatūros t_2 ir kondensavusis gautiems garams, gaunamas naujas kondensatas, kurio koncentracija $y_2^* = x_3$, $x_3 > x_2$, t. y. skystis dar labiau prisodrinamas *ŽVK*. Taigi galima gauti skystį iš gryno *ŽVK*. Analogiškai galima paaiškinti skysčio prisodrinimo *AVK* procesą. Kadangi perskiriamame skystyje ir gaunamuose garuose komponentų koncentracijų masės dalimis suma lygi vienetui, tai skystyje išgarinant žemesnės virimo koncentracijos komponentą, skysčio likutyje *AVK* kiekis didės. Aprašytasis procesas gali būti atliekamas nuosekliai sujungtų distiliacijos aparatų grandinėje. Tačiau taip rektifikacijos procesas organizuojamas labai retai, nes tai neekonomiška.

Todėl rektifikacijos procesas atliekamas kolonose (dažniausiai lėkštinėse, taip pat įkrautinėse ar plėvelinėse), virš skysčio esant atmosferos slėgiui, padidintam slėgiui arba vakuumui. Slėgiuose, didesniuose už atmosferos slėgį, dažniausiai rektifikuojamos suskystintosios dujos, pvz., oras perskiriamas į deguonį ir azotą; esant vakuumui, perskiriami aukštoms virimo temperatūroms termiškai neatsparūs skysčių mišiniai, taip pat artimų virimo temperatūrų komponentų mišiniai. Rektifikuojama dažniausiai nuolatinio veikimo kolonose. Periodinė rektifikacija naudojama, kai reikia perskirti dažnai besikeičiančios sudėties mišinius ir esant mažiems našumams.

18.3.1. Rektifikacijos įrenginiai

Rektifikacijos schemos. Panagrinėsime binarinių mišinių perskyrimo nuolatinio veikimo rektifikacijos kolonos schemą, pateiktą 18.13 paveiksle.



18.13 pav. Nuolatinio veikimo rektifikacijos kolonos schema:
1 – pradinio mišinio rezervuaras, *2* – šildytuvas, *3* – kolona, *4* – virintuvas, *5* – deflegmatorius, *6* – flegmos daliklis, *7* – aušintuvas, *8* – distiliato rinktuvas, *9* – likučio rinktuvas

Nuolatinės rektifikacijos kolonoje perskirti tiekiamas skystis turi liestis su prieš priešais tekančiu šiek tiek daugiau *ŽVK* negu skystis turinčių garų srautu. Todėl pradinis mišinys tiekiamas į tokią kolonos *3* vietą, kuri tenkintų šiuos reikalavimus. Pradinis mišinys, šildytuve *2* pašildytas iki virimo temperatūros, tiekiamas į vadinamąją maitinimo lėkštę. Maitinimo lėkštės vieta, arba pradinio mišinio tiekimo vieta, specialiai apskaičiuojama.

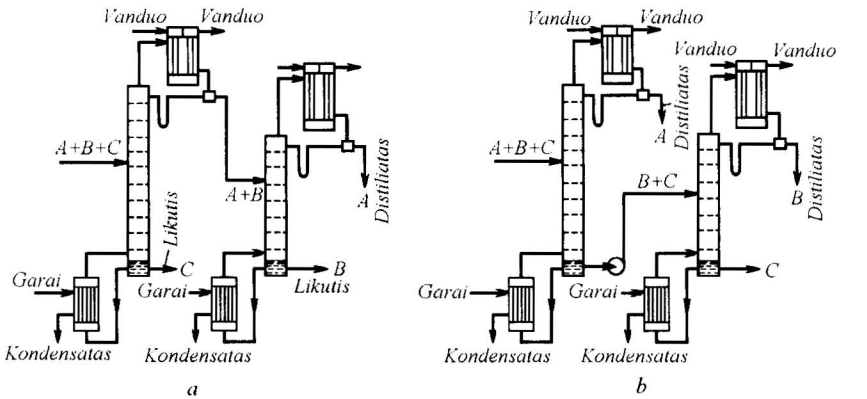
Maitinimo lėkštė koloną dalija į dvi dalis: viršutinę, arba koncentruojamąją, ir apatinę, arba išgaunamąją. Koncentruojamojoje dalyje kylantys garai prisodrinami *ŽVK*, o išgaunamojoje, arba apatinėje, dalyje *ŽVK* iš skysčio išgarinamas. Kolona kylantis garų srautas papildomas virintuve *4* išgarinant dalį skysčio, kuris vadinamas virintuvo likučiu, o kolona žemyn tekantis skysčio srautas – grąžinant dalį flegmos, gautos deflegmatoriuje *5* kondensavusis iš kolonos tiekiamiems garams. Į koloną grąžintos flegmos kiekio F santykis su surinkto distiliato kiekiu D vadinamas flegmos skaičiumi ir žymimas R ($R = F/D$). Flegmos skaičiaus sąvoka vartojama, kad būtų patogiau analizuoti ir skaičiuoti rektifikaciją.

Nuolatinės rektifikacijos pranašumai yra didelis našumas ir gauto produkto tolygumas, be to, procesą nesunku automatizuoti, galima panaudoti produkto ir virintuvo likučio šalinamą šilumą.

Praktiškai nepertraukiamai rektifikuojant daugiakomponenčius mišinius, rektifikacijos kolona turi būti ne viena, kadangi vienoje kolonoje mišinį galima perskirti tik į du produktus. Kolonų skaičius turi būti lygus perskiriamajame mišinyje esančių komponentų skaičiui minus vienas, t. y.

$$N = k - 1 .$$

Tai bus aiškinama kalbant apie trijų komponentų mišinio rektifikaciją (18.14 pav.).



18.14 pav. Du trijų komponentų mišinio rektifikacijos variantai (*a* ir *b*)

Šiuo perskyrimo atveju galimi du proceso organizavimo variantai. 18.14 pav., *a*, parodytu atveju du lakesni komponentai *A ir B* patenka į distiliatą, komponentas *C* (*AVK*) pasilieka virintuvo likutyje. Distiliatas, sudarytas iš komponentų *A* ir *B*, tiekiamas į antrąją koloną. Variante *b* pirmosios kolonos virintuvo likutyje pasilieka komponentai *B* ir *C*, kurie tiekiami perskirti į antrąją koloną. Rektifikuojant daugiakomponenčius mišinius, visos kitos kolonos po pirmosios taip pat turi būti sudarytos iš dviejų dalių – apatinės ir viršutinės.

Reikia pasakyti, kad variantas *a* ir į jį panašūs, skirtingai negu variantas *b*, ne visada gali būti taikomi, nes yra ribojami santykinių lakumų santykio ir komponentų kiekio pradiniame mišinyje. Pavyzdžiui, mišinio *A ir B* komponentus atskirti nuo *C* (18.14 pav., *a*) galima tik tenkinant sąlygą $\alpha_B > (\alpha_A + \alpha_C)$ arba $\alpha_B > \sum \alpha \cdot x$. Čia $\sum \alpha \cdot x = \alpha_A \cdot x_A + \alpha_C \cdot x_C$ – kitų komponentų suminis santykinis lakumas. Taigi *i*-ajį komponentą atskirti į garus

galima tik tuomet, kai jo santykinis lakumas α_i yra didesnis už visų komponentų vidutinį santykinį lakumą:

$$\sum \alpha_i \cdot x_i = \alpha_A \cdot x_A + \alpha_B \cdot x_B + \alpha_C \cdot x_C + \ldots$$

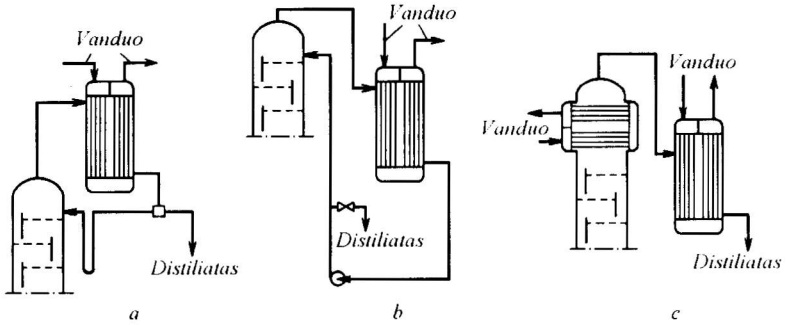
Didėjant komponentų skaičiui pradiniame mišinyje kolonų tarpusavio sujungimo variantų skaičius greitai didėja.

Rektifikacijos aparatai. Pagrindiniai rektifikacijos aparatai yra lėkštinės ir įkrautinės kolonos, kurių konstrukcija iš principo yra tokia pat kaip lėkštinių ir įkrautinių adsorberių, nagrinėtų 17-oje dalyje.

Norint padidinti fazių sąlyčio paviršių, įkrautinėse rektifikacijos kolonose dažnai naudojama fasoninė įkrova, turinti didelį savitąjį paviršių ir laisvąjį tūrį. Paprastai tokia gana brangi įkrova naudojama perskiriant artimų virimo temperatūrų mišinius.

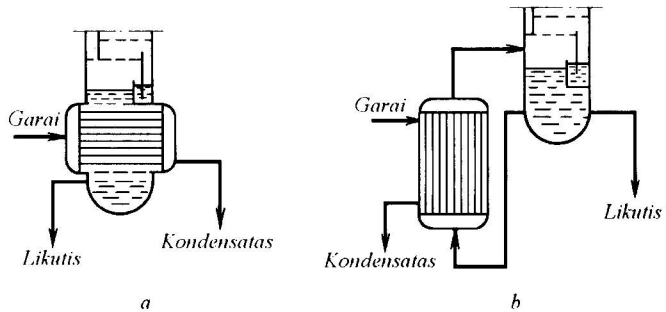
Rektifikacijos kolonų pagrindinis savitumas yra tai, kad rektifikacijos procesui atlikti jos turi turėti atitinkamus šilumokaičius: virintuvą, šildytuvą, kondensatorių-deflegmatorių, distiliato ir virintuvo likučio aušintuvus arba šaldytuvus.

Paprastai deflegmatoriai (18.15 pav., *a*) įrengiami aukščiau kolonos, kad flegma į koloną tekėtų savitaka. Jeigu kolona labai aukšta, kad būtų patogiau ją aptarnauti, deflegmatorius įrengiamas žemiau kolonos viršaus (18.15 pav., *b*). Šiuo atveju kolonai laistyti reikalingai flegmai tiekti būtina įrengti papildomą siurblį. Kai kada deflegmatorius įrengiamas kolonos viršutinėje dalyje (18.15 pav., *c*). Tokiu atveju iš kolonos ištekančių garų kiekis lygus distiliato kiekiui.



18.15 pav. Deflegmatorių išdėstymo variantai: *a* – kai visi garai kondensuojami ir flegma tiekiama į koloną savitaka, *b* – kai visi garai kondensuojami ir flegma tiekiama į koloną siurbliais, *c* – kai garai iš dalies kondensuojami; *1* – kolona, *2* – deflegmatorius, *3* – siurblys, *4* – aušintuvas

Kolona kylančių garų srautams sudaryti naudojami įvairių konstrukcijų virintuvai, kurie gali būti įrengti kolonos apatinės dalies viduje (18.16 pav., *a*) arba įrengiami šalia kolonos (18.16 pav., *b*). Pastarasis variantas praktikoje pasitaiko dažniau, nes šiuo atveju lengviau remontuoti ir pakeisti virintuvą.
Kiek mažiau rektifikacijai naudojamos tinklinės lėkštinės kolonos. Tokios kolonos apie 30...40 % pigesnės ir jų hidraulinis pasipriešinimas šiek tiek mažesnis negu lėkštinių kolonų su gaubtais. Lėkštinių kolonų gaubtų funkcijas tinklinėse kolonose atlieka tinklo angos, kurių skersmuo 0,8...8 mm.



18.16 pav. Pačioje kolonoje (*a*) ir atskirai (*b*) įrengto virintuvo išdėstymas: *1* – kolona, *2* – virintuvas

Pastaruoju metu maisto pramonėje paplito ir kombinuotosios kolonos. Jų apatinę dalį sudaro įkrautinė kolona, viršutinę – lėkštinė.

18.3.2. Rektifikacijos kolonų darbo analizė ir jų skaičiavimas

Yra du pagrindiniai rektifikacijos kolonų darbo analizės ir skaičiavimo metodai: grafoanalitinis, dažnai vadinamas tiesiog grafiniu, ir analitinis.

Grafinis rektifikacijos kolonų darbo analizės ir skaičiavimo metodas yra paprastesnis ir vaizdesnis, todėl nuo jo ir pradėsime.

Taikant šį būdą, būtina daryti prielaidas, kurios mažai iškreipia realų procesą, bet gerokai suprastina jo analizę ir skaičiavimą:

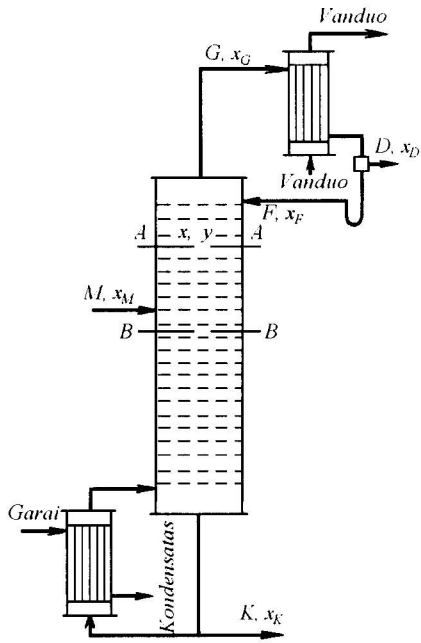
1) molinė skirtingų komponentų garavimo šiluma, esant tai pačiai temperatūrai, apytiksliai yra ta pati (Trugano taisyklė), todėl kondensavusis vienam kilomoliui garų, išgaruoja vienas kilomolis skysčio. Todėl kolona kylančių garų kiekis visuose kolonos skerspjūviuose yra vienodas;

2) deflegmatoriuje garų sudėtis nesikeičia. Jeigu visi garai kondensuojasi deflegmatoriuje, tokia padėtis visiškai atitinka realias sąlygas;

3) virintuve išgaruojant skysčiui, jo sudėtis nesikeičia. Todėl virintuve susidariusių garų sudėtis tokia pat, kaip ir jame likusio skysčio, t. y. $y_K = x_K$;

4) perskiriamojo mišinio komponentų maišymosi šiluma lygi nuliui;

5) iš kolonos ištekančių garų sudėtis tokia pat kaip distiliato, t. y. $y_D = x_D$.



18.17 pav. Srautų schema rektifikacijos kolonoje: *M ir* x_M – į koloną tiekiamo skysčio kiekis, kmol/s, ir *ŽVK* koncentracija, molio dalimis; *D* ir x_D – distiliato srautas ir *ŽVK* koncentracija distiliate; *K* ir x_K – virintuvo likučio srautas ir *ŽVK* koncentracija virintuvo likutyje; *V* – koloną paliekančių garų kiekis, kmol/s

Kad gautume darbo linijų lygtis, turime užrašyti rektifikacijos kolonos medžiagų balanso lygtis viso srauto ir *ŽVK* atžvilgiu. Viso srauto atžvilgiu:

$$M + F = V + K \text{, tačiau } V = D + F \text{ ir todėl } M = D + K ; \quad (18.20)$$

ŽVK atžvilgiu:

$$M \cdot x_M = D \cdot x_D + K \cdot x_K . \quad (18.21)$$

Kadangi kolonos apatinės ir viršutinės dalies darbo sąlygos skirtingos, tai jų medžiagų balanso lygtis reikia nagrinėti ir atskirai. Viršutinėje kolonos dalyje laisvai pasirenkamas skerspjūvis *A–A* (18.17 pav.), kuriame momentinės koncentracijos *x* ir *y*. Parašysime viršutinės kolonos dalies, esančios tarp skerspjūvio *A–A* ir garų išleidimo angos, medžiagų balansą *ŽVK* atžvilgiu:

$$V \cdot y + L \cdot x_D = V \cdot y_D + L \cdot x ;$$

iš čia

$$y = y_D - (L/V) \cdot (x_D - x), \tag{18.22}$$

kur L – viršutine kolonos dalimi besileidžiantis flegmos kiekis:

$$L = F = D \cdot R . \tag{17.23}$$

Kolona kylančių garų kiekis

$$V = F + D = D \cdot R + D = D \cdot (R + 1). \tag{18.24}$$

Pagal prielaidą $y_D = x_D$. Įrašę į (18.22) lygtį atitinkamas L ir V vertes, gauname tokią lygties išraišką:

$$y = x_D - \frac{D \cdot R}{D \cdot (R+1)} \cdot (x_D - x) = \frac{R}{R+1} \cdot x - \frac{R}{R+1} \cdot x_D + x_D =$$

$$= \frac{R}{R+1} \cdot x - x_D \cdot \left(1 - \frac{R}{R+1}\right).$$

Iš čia gaunama viršutinės kolonos dalies darbo linijos lygtis:

$$y = [R/(R+1)] \cdot x + x_D/(R+1). \tag{18.25}$$

Kai $x = x_D$ ir $y = x_D$, koncentruojamosios (viršutinės) kolonos dalies darbo linija kerta įstrižainę taške, kurio abscisė x_D. To ir galima buvo tikėtis pagal antrąją prielaidą.

Pažymėjus $R/(R+1) = A$ ir $x_D/(R+1) = B$, (18.25) lygtis įgaus išraišką

$$y = A \cdot x + B , \tag{18.26}$$

kuri yra tiesės lygtis. A – tiesės pasvirimo į abscisių ašį kampo α tangentas, o B – darbo linijos ordinačių ašyje atkertama atkarpa (18.18 pav.).

Sudarant lygtį apatinei kolonos daliai skaičiuoti, reikia atsižvelgti į tai, kad kolonai laistyti naudojamas skysčio kiekis padidėja pradinio mišinio kiekiu M. Parašoma kolonos apatinės dalies, esančios žemiau laisvai pasirinkto jos skerspjūvio B–B ploto (18.17 pav.), kur *ŽVK* koncentracija yra y ir x, balanso lygtis.

Apatine kolonos dalimi kylančių garų kiekį pažymime V', o besileidžiančio skysčio – L'. Tuomet

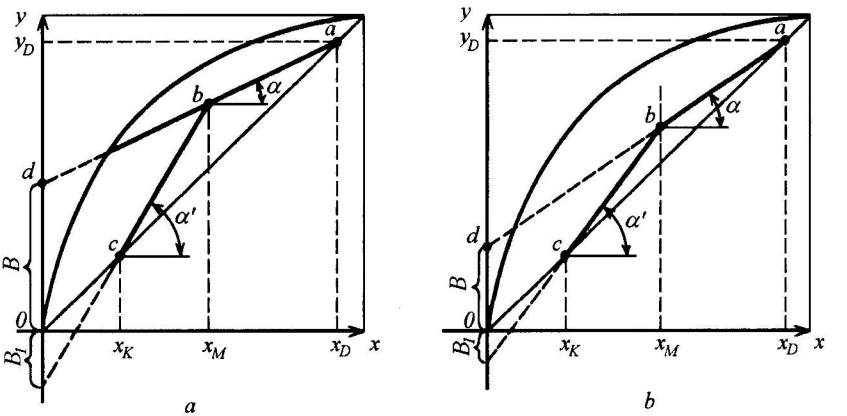
$$V' \cdot y_K + L' \cdot x = V' \cdot y + L' \cdot x_K .$$

Jeigu pažymėsime $f = M/D$, tai $M = f \cdot D$. Apatine kolonos dalimi tekantis flegmos kiekis $L' = F + M = D \cdot R + R \cdot D = D \cdot (R + f)$. Kolona kylančių garų kiekis nesikeičia, t. y.

$$V' + V = D \cdot (R + 1);$$

iš čia:

$$y = y_K + (L'/V') \cdot (x - x_K) = y_K + (x - x_K) \cdot D \cdot (R + f)/[D \cdot (R + 1)].$$



18.18 pav. Darbo linijų grafinis vaizdas: *a* – viršutinės, *b* – apatinės kolonos dalies

Kadangi $y_K = x_K$, gauname:

$$y = x_K + [(R + f)/(R + 1)] \cdot (x - x_K) =$$
$$= x_K + [(R + f)/(R + 1)] \cdot x - [(R - f)/(R + 1)] \cdot x_K =$$
$$= [(R + f)/(R + 1)] + x_K \cdot [1 - [(R + f)/(R + 1)]].$$

Po atitinkamų pertvarkymų gauname:

$$y = [(R + f)/(R + 1)] \cdot x - [(f - 1)/(R + 1)] \cdot x_K, \qquad (18.27)$$

arba

$$y = A_1 \cdot x - B_1; \qquad (18.28)$$

čia $A_1 = tg\alpha'$ (18.18 pav.); B_1 – atkarpa, darbo linijos atkertama ordinačių ašyje (18.18 pav.).

Kai $x = x_K$ ir $y = x_K$, apatinės kolonos dalies darbo linija eina per tašką, kurio abscisė x_K.

Taigi apatinės kolonos dalies darbo linija su diagramos įstrižaine kertasi taške, kurio abscisė x_K, o viršutinės dalies – taške x_D. Abiejų kolonos dalių darbo linijos susikerta taške, kurio abscisės ir ordinatės vertės bus gaunamos išsprendus (18.25) ir (18.27) lygtis ir turės vienodas skaitines vertes. Todėl palyginus šių lygčių dešiniąsias puses, gaunama tokia lygtis:

$$[R/(R+1)]\cdot x + [x_D/(R+1)] = [(R+f)/(R+1)]\cdot x - [(f-1)/(R+1)]\cdot x_K ,$$

arba $R\cdot x + x_D = (R+f)\cdot x - (f-1)\cdot x_K$.

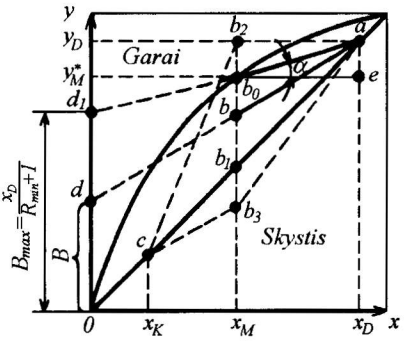
Išsprendę pastarąją lygtį abscisės atžvilgiu, kai ordinatė y, gausime $x = x_M$, t. y. viršutinės ir apatinės kolonos dalies darbo linijų susikirtimo taško abscisė lygi pradinio mišinio *ŽVK* koncentracijai. Šis taškas atitinka pradinio mišinio tiekimo į kolonos skerspjūvį arba maitinimo lėkštę padėtį. Po to galima nubraižyti kolonos darbo linijas.

x–y diagramoje nubrėžus perskiriamosios sistemos pusiausvyros liniją bei diagramos įstrižainę, abscisėje atidedamos pasirinktos koncentracijos: x_M, x_D ir x_K (koncentracijos, taip pat ir diagrama, dažniausiai išreiškiamos molio dalimis arba molio procentinėmis dalimis). Per abscises x_D ir x_K iškėlus statmenis iki susikirtimo su įstrižaine, surandami taškai *a* ir *c* (18.18 pav.). Jeigu duota flegmos skaičiaus R vertė, tai ordinatėje atidedama apskaičiuota $B = x_D/(R+1)$ vertė ir gautas taškas *d* sujungiamas su tašku *c*. Per tašką x_M iškėlus statmenį iki susikirtimo su linija *cd*, gaunamas darbo linijų susikirtimo taškas *b*. Sujungus tašką *b* su tašku *a*, gaunamos apatinės ir viršutinės kolonos dalies darbo linijos *ab* ir *bc*. Teorinių koncentracijos kitimo pakopų arba laipsnių skaičiui nustatyti tarp darbo ir pusiausvyros linijų koncentracijų intervale x_K ir x_D brėžiamos pakopos (apie tai buvo rašoma 16.7.2 sk.).

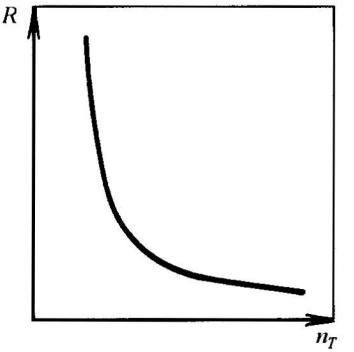
Rektifikacijos, priešingai negu absorbcijos, darbo linijos esti žemiau pusiausvyros linijos.

Analizuojant darbo linijų padėties priklausomybę nuo flegmos skaičiaus, galima nustatyti flegmos skaičiaus kitimo intervalą ir jo vertę optimaliam proceso organizavimui. Praktinis flegmos skaičius nebūna duotas ir jį reikia tinkamai parinkti. Tai ypač svarbu, kai kolonos labai našios.

Darbo linijų susikirtimo taškas (18.19 pav., taškas *b*) priklauso nuo atkarpos $B = x_D/(R+1)$, kuri kinta kintant R, kadangi $x_D = const$. Šis taškas gali judėti vertikalės x_M intervale nuo b_0 iki b_1. Darbo linijos negali susikirsti taškuose b_2 ir b_3.



18.19 pav. Darbo linijų vaizdavimas *y–x* diagramoje



18.20 pav. Teorinių lėkščių skaičiaus n_T priklausomybė nuo flegmos skaičiaus *R*

Vienu atveju (taškas b_2) darbo linija kerta pusiausvyros liniją, bet taip negali būti, nes rektifikacijos metu $y < y^*$.

Kitu atveju darbo linijos taške b_3 negali susikirsti, nes šiame taške *ŽVK* kiekis garuose būtų mažesnis negu skystyje, o distiliuojant to negali būti. Todėl darbo koncentracijų linijos gali susikirsti tik linijos x_M intervale nuo b_0 iki b_1, t. y. tarp įstrižainės ir pusiausvyros linijos.

Darbo linijoms susikirtus taške b_0, darbo koncentracijos tampa lygios pusiausviroms, o tai gali atsitikti tik esant be galo dideliems fazių sąlyčio paviršiaus plotams, nes tada $\Delta y_{vid} = 0$. Iš masės perdavimo lygties išplaukia $F = M/(K_y \cdot \Delta y_{vid})$, kai $\Delta y_{vid} = 0$, arba nustatant teorinį lėkščių skaičių ($n_{0y} = (y_g - y_p)/\Delta y_{vid}$, kai $\Delta y_{vid} = 0$). Šiuo atveju (18.19 pav., linija ad_1) flegmos skaičius turi būti minimalus, o atkarpos *B* ilgis – maksimalus, t. y.

$$B_{max} = x_D/(R_{min} + 1) \text{ arba } R_{min} = (x_D - B_{max})/B_{max}. \qquad (18.29)$$

B_{max} nustatomas grafiškai (18.19 pav.).

Iš viršutinės kolonos dalies darbo linijos (18.26) lygties nagrinėjamu atveju (t. y. esant darbo linijų susikirtimo taške b_0 sąlygai) galima gauti:

$$A = R_{min}/(R_{min} + 1) = tg\alpha.$$

Iš čia

$$tg\alpha = ae/(b_0e) = (y_D - y_M^*)/(x_D - x_M) = (x_D - y_M^*)/(x_D - x_M) =$$
$$= R_{min}/(R_{min} + 1). \qquad (18.30)$$

Išsprendę (18.30) lygtį R_{min} atžvilgiu, gausime:

$$R_{min} = \left(x_D - y_M^*\right)/\left(y_M^* - x_M\right) = \left(y_D - y_M^*\right)/\left(y_M^* - x_M\right). \qquad (18.31)$$

Jei darbo linijos susikerta taške b_1, esančiame įstrižainėje, t. y. jeigu darbo linijų kryptis sutampa su diagramos įstrižainės kryptimi, atkertamos ordinatės atkarpos B ilgis tampa lygus nuliui, ir tada $R = \left(x_D - 0\right)/0 = \infty$. Šiuo atveju teorinių lėkščių skaičius minimalus, kadangi darbo linija maksimaliai nutolusi nuo pusiausvyros linijos. Praktiškai taip kolona gali dirbti, kai nesurenkamas distiliatas, t. y. kai ji neduodama produkcijos ir $R = F/0 = \infty$. Realių procesų metu darbo linijos susikerta taške b, kuris atitinka sąlygas $R > R_{min}$ ir $R = a \cdot R_{min}$. Dydis a vadinamas flegmos pertekliaus koeficientu ir dažniausiai būna nuo 1,1 iki 3,0.

18.20 pav. pavaizduota tipinė teorinių lėkščių skaičiaus priklausomybė nuo flegmos skaičiaus. Naudojant panašią priklausomybę $n = f(R)$, galima nustatyti tik orientacinę darbinio flegmos skaičiaus vertę, kadangi tokiu atveju (18.20 pav.) įvertinami tik kapitaliniai įdėjimai į procesą. Norint rasti optimalų flegmos skaičių, būtina įvertinti ir eksploatacines rektifikacijos proceso išlaidas, kurios turi daugiausia įtakos bendrai proceso vertei (nagrinėjamu atveju tai visų pirma šilumos sąnaudos procesui atlikti).

Sudarant daugiakomponenčių mišinių kiekvieno komponento medžiagų balansą, gaunama darbo linijų lygtis, analogiška binarinių mišinių (18.25) ir (18.27) lygtims. Pavyzdžiui, trijų komponentų mišinio $A+B+C$ viršutinėje kolonos dalyje darbo linijų lygtys būtų:

$$y_A = \left[R/(R+1)\right] \cdot x_A + x_{AD}/(R+1), \qquad (18.32a)$$

$$y_B = \left[R/(R+1)\right] \cdot x_B + x_{BD}/(R+1), \qquad (18.32b)$$

$$y_C = \left[R/(R+1)\right] \cdot x_C + x_{CD}/(R+1). \qquad (18.32c)$$

Bendruoju atveju i-ojo mišinio komponento

$$y_i = \left[R/(R+1)\right] \cdot x_i + x_{iAD}/(R+1). \qquad (18.32d)$$

Apatinėje kolonos dalyje:

$$y_A = \left[(R+f)/(R+1)\right] \cdot x_A - \left[(f-1)/(R+1)\right] \cdot x_{AK}, \qquad (18.33a)$$

$$y_B = \left[(R+f)/(R+1)\right] \cdot x_B - \left[(f-1)/(R+1)\right] \cdot x_{BK}, \qquad (18.33b)$$

$$y_A = \left[(R+f)/(R+1)\right] \cdot x_C - \left[(f-1)/(R+1)\right] \cdot x_{CK}, \qquad (18.33c)$$

mišinio i-ojo komponento:

$$y_A = \left[(R+f)/(R+1)\right]\cdot x_i - \left[(f-1)/(R+1)\right]\cdot x_{iK}; \qquad (18.33d)$$

čia y_A, y_B, y_C, y_i – komponentų *A, B, C, ..., i* koncentracija garuose bet kuriame kolonos apatinės arba viršutinės dalies skerspjūvyje; x_A, x_B, x_C, x_i – komponentų *A, B, C, ..., i* koncentracija skystyje bet kuriame kolonos apatinės arba viršutinės dalies skerspjūvyje; x_{AD}, x_{BD}, x_{CD}, ..., x_{iD} ir x_{AK}, x_{BK}, x_{CK}, ..., x_{iK} – komponentų *A, B, C, ..., i* koncentracija atitinkamai distiliate ir virintuvo likutyje.

Minimalus flegmos skaičius kiekvieno iš daugiakomponenčio mišinio komponentų apskaičiuojamas pagal (18.31) lygtį. Pavyzdžiui, komponento *A*

$$R_{min} = \left(x_{AD} - y^*_{AM}\right)/\left(y^*_{AM} - x_{AM}\right) = \left(y_{AD} - y^*_{AM}\right)/\left(y^*_{AM} - x_{AM}\right), \qquad (18.34)$$

arba bet kokio *i*-ojo komponento

$$R_{min} = \left(x_{iD} - y^*_{iM}\right)/\left(y^*_{iM} - x_{iM}\right) = \left(y_{iD} - y^*_{iM}\right)/\left(y^*_{iM} - x_{iM}\right);$$

čia y^*_{AM} ir y^*_{iM} – komponentų *A* ir *i* koncentracija, pusiausvira su pradiniu mišiniu, kuriame jų koncentracija atitinkamai yra x_{AM} ir x_{iM}.

Rektifikacijos kolonos šilumos balansas. Nuolatinio veikimo rektifikacijos kolonos (18.21 pav.) šilumos balansas užrašomas tokia lygtimi:

$$\Phi_{vir} + \Phi_M + \Phi_F = \Phi_V + \Phi_K + \Phi_n; \qquad (18.35)$$

čia Φ_{vir} – šildančiųjų garų į virintuvą įneštas šilumos srautas, W; Φ_M – pradinio mišinio į koloną įneštas šilumos srautas, W; Φ_F – flegmos į koloną įneštas šilumos srautas, W; Φ_V – garų iš kolonos išneštas šilumos srautas, W; Φ_K – likučio išneštas iš virintuvo šilumos srautas, W; Φ_n – šilumos nuostolių į aplinką srautas, W.

Kadangi $M = D + K$, $V = D\cdot(R+1)$ ir $F = D\cdot R$, gauname:

$$\Phi_{vir} = (D+K)\cdot H_m + D\cdot R\cdot H_F = D\cdot(R+1)H_V + K\cdot H_K + \Phi_n.$$

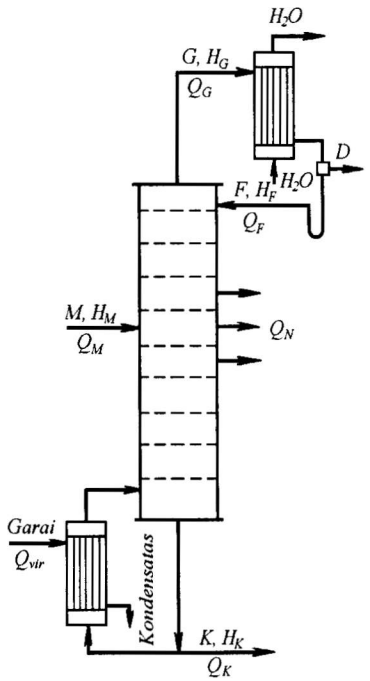
Pagrindinė rektifikacijos proceso šilumos sąnaudų dalis Φ_{vir} apskaičiuojama taip:

$$\Phi_{vir} = D\cdot(R+1)H_V + K\cdot H_K + \Phi_n - (D+K)\cdot H_m - D\cdot R\cdot H_F =$$
$$= D\cdot R\cdot H_V + D\cdot H_V + K\cdot H_K + +\Phi_n - D\cdot H_F - D\cdot R\cdot H_F - K\cdot H_F =$$
$$= D\cdot R\cdot(H_V - H_F) + D\cdot(H_V - H_M) + K\cdot(H_K - H_M) + \Phi_n.$$

Bet kadangi $H_V - H_F = r_F$ (r_F – flegmos garavimo šiluma), tada

$$\Phi_{vir} = D\cdot R\cdot r_F + D\cdot(H_V - H_M) + K\cdot(H_K - H_M) + \Phi_n; \qquad (18.36)$$

čia $D \cdot R \cdot r_F$ – šilumos sąnaudos flegmai garinti; $D \cdot (H_V - H_M)$ – šilumos sąnaudos distiliatui garinti; $K \cdot (H_K - H_M)$ – šilumos sąnaudos likučiui virintuve pašildyti nuo į koloną įtekančio pradinio mišinio temperatūros iki likučio virimo temperatūros.



18.21 pav. Rektifikacijos kolonos šilumos srautų schema

Šildančiųjų garų sąnaudos virintuve

$$G_g = \Phi_{vir} / r ;$$

čia r – šildančiųjų garų susidarymo šiluma.

Jeigu $H_M \approx H_F$, tai (18.36) lygtis tampa paprastesnė:

$$\Phi_{vir} = D \cdot (R + 1) \cdot r_F \cdot + K \cdot (H_K - H_M) + \Phi_n. \qquad (18.37)$$

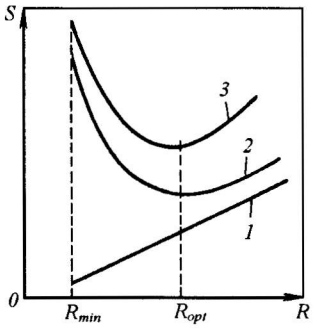
(18.37) lygtis rodo, kad šilumos sąnaudos priklauso nuo flegmos skaičiaus R.

Reikia pasakyti, kad rektifikacijos šilumos sąnaudos yra didelės, todėl projektuojant rektifikacijos schemas reikia numatyti galimybę bent dalį sunaudotos šilumos rekuperuoti.

Daugiausia šilumos sutaupoma naudojant vadinamąjį šilumos siurblio principą, kada iš kolonos ištekantys garai patenka į kompresorių, kuriame suslegiami iki slėgio, atitinkančio garų kondensacijos temperatūrą virintuve. Šitaip taupant šilumą, nereikia deflegmatoriaus ir aušinimo vandens garams kondensuoti. Suprantama, racionaliausia šį taupymo variantą naudoti rektifikuojant artimų virimo temperatūrų komponentų mišinius.

Jeigu likutį virintuve sudaro vanduo su nedideliu kiekiu priemaišų, tai tikslinga jį šildyti ne per sienelę, o tiesiogiai į jį tiekiant šildančiuosius garus. Tokiu atveju nereikalingas virintuvas ir šilumos pernešimo procesas dėl tiesioginio agentų kontakto pagerėja.

Preliminariai pradinis mišinys pašildomas leidžiant jį per deflegmatorių arba distiliato ir virintuvo likučio aušintuvus. Taigi atliekant procesą, taupoma ne tik šiluma pradiniam tirpalui pašildyti, bet ir aušinimo vanduo deflegmatoriuje, distiliato ir likučio aušintuvuose. Todėl skaičiuojant rektifikacijos schemas, reikia pagal techninių ekonominių skaičiavimų rezultatus parinkti racionaliausią šiluminę schemą.

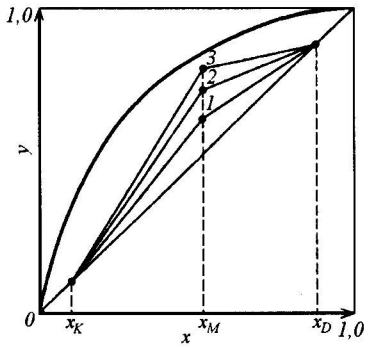


18.22 pav. Optimalaus flegmos skaičiaus nustatymas pagal proceso techninių ekonominių skaičiavimų rezultatus: *1* – eksploatacijos išlaidos (*E*), *2* – kapitaliniai įdėjimai, *3* – bendros rektifikacijos išlaidos

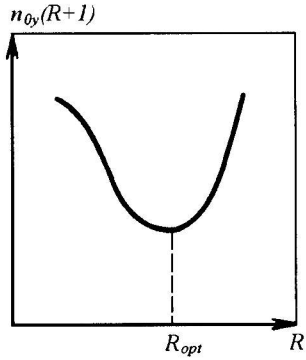
Darbinio flegmos skaičiaus parinkimas. Tipinė teorinių lėkščių skaičiaus (kolonos aukščio) priklausomybė nuo flegmos skaičiaus pavaizduota (18.20 pav.). Iš paveikslo matyti, kad didėjant flegmos skaičiui, mažėja teorinių lėkščių skaičius. Tačiau, didėjant flegmos skaičiui, didėja rektifikacijos šilumos (šildančiųjų garų) sąnaudos. Todėl optimalų flegmos skaičių teisingiausiai galima nustatyti tik atlikus proceso techninius ekonominius skaičiavimus (18.22 pav.).

Eksploatacijos sąnaudos didėja proporcingai didėjant *R*, kadangi jos nusakomos rektifikacijos proceso šilumos sąnaudomis. Kapitalinės sąnaudos mažėja didėjant *R* iki tam tikros vertės, toliau didinant *R* kapitalinės sąnaudos didėja. Tai aiškinama tuo, kad, didėjant *R*, didėja ir kolonos laistymo tankis, o tai dažnai sumažina leistiną garų greitį kolonoje, todėl būtina didinti kolonos skersmenį. Didinant kolonos skersmenį padidėja kolonos tūris, taip pat kapitaliniai įdėjimai. Todėl suminių rektifikacijos išlaidų priklausomybės nuo flegmos skaičiaus *R* kreivė turi turėti minimumą, kuris ir nusako optimalią flegmos skaičiaus vertę R_{opt}.

Optimalus flegmos skaičius nustatomas pagal tokią metodiką. Iš intervalo nuo R_{min} iki ∞ parinkus kelias R vertes, y–x diagramoje gaunama keletas darbo linijų padėčių (18.23 pav.) su darbo linijų susikirtimo taškais *1, 2, 3* ir t. t., išsidėsčiusiais vertikalėje, nubrėžtoje per abscisę x_M. Kiekvienai darbo linijai nustatomas teorinis lėkščių skaičius n_{0y}, o paskui nubraižoma grafinė priklausomybė $n_{0y}(R+1)=f(R)$.



18.23 pav. Optimalaus flegmos skaičiaus nustatymas



18.24 pav. Optimalaus flegmos skaičiaus parinkimas pagal grafinę priklausomybę $n_{0y}(R+1)=f(R)$

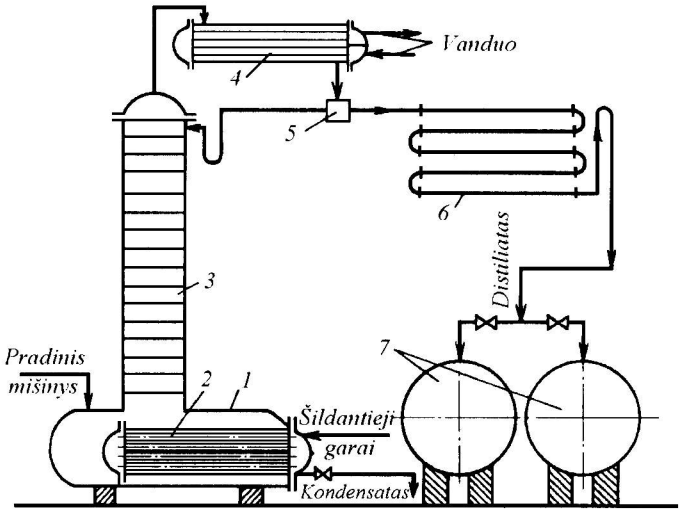
Dydis n_{oy} apytiksliai lygus kolonos aukščiui H, o $(R+1)$ – iš kolonos ištekančių garų debitui V. Tam pačiam kolonos skerspjūviui $S \approx V$, t. y. sandauga $n_{0y}\cdot(R+1)\approx S\cdot H \approx V_{kol}$ (čia V_{kol} – kolonos tūris). Taigi dydis $n_{0y}\cdot(R+1)$ apibūdina tiek eksploatacines išlaidas, tiek kapitalinius įdėjimus. 18.24 pav. pavaizduota tipinė priklausomybė $n_{0y}(R+1)=f(R)$.

Šios priklausomybės grafiko sudarymui suprastinti vietoj dydžio n_{0y} ordinatėje galima atidėti $n_T\cdot(R+1)$, kur n_T – teorinis lėkščių skaičius.

18.4. Periodinė rektifikacija

Periodinio veikimo kolonos naudojamos tuomet, kai technologiniuose procesuose reikia perskirti nedidelius mišinių kiekius ir turėti pakankamai laiko, kad normaliam perskyrimo procesui būtų galima sukaupti reikiamą pradinio mišinio kiekį, arba kai labai dažnai keičiasi pradinio mišinio sudėtis. Pastarasis atvejis tinka, kai gaunami įvairūs produktai. Periodinės rektifikacijos technologinės schemos identiškos principinei rektifikacijos schemai. Viena iš galimų technologinių schemų pavaizduota 18.25 pav.

Pradinis mišinys supilamas į virintuvą *1* su šilumokaičiu, į kurį tiekiamas šildalas, pvz., sotieji vandens garai. Pradinis mišinys pašildomas iki virimo temperatūros. Susidarę garai kyla kolona *3*. Kolonoje garai sąveikauja su jiems priešpriešiais kolona iš deflegmatoriaus *4* tekančiu skysčiu (flegma). Deflegmatoriuje *4* susidaręs kondensatas srauto daliklyje perskiriamas į dvi dalis: viena dalis grąžinama į koloną kaip flegma F, kita – distiliatas D per aušintuvą *6* tiekiama į vieną iš rinktuvų *7*.



18.25 pav. Periodinės rektifikacijos technologinė schema: *1* – virintuvas, *2* – šildytuvas, *3* – rektifikacijos kolona, *4* – deflegmatorius, *5* – srauto daliklis, *6* – aušintuvas, *7* – rinktuvas

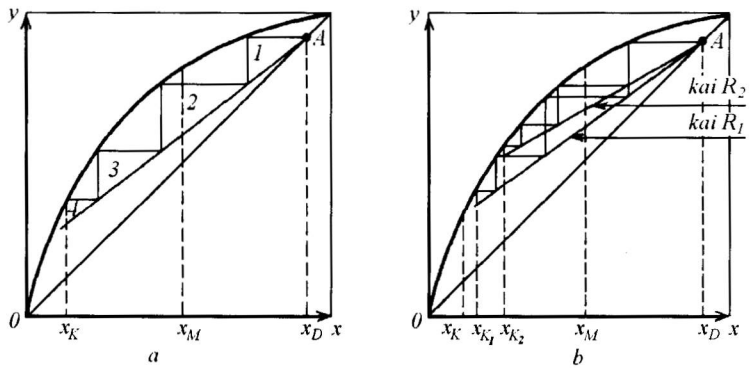
Rektifikacijos procesas užbaigiamas, kai gaunamas nurodytos vidutinės sudėties distiliatas. Taigi kolona *3* yra nuolatinio veikimo kolonos viršutinės (koncentruojančios) dalies analogas, o virintuvas atlieka apatinės (išgaunančiosios) kolonos dalies vaidmenį.

Periodinę rektifikaciją galima atlikti dviem būdais: 1) kai gaunamas pastovios sudėties distiliatas ($x_D = const$) ir 2) kai palaikomas pastovus darbinis flegmos skaičius ($R_d = const$).

Pirmuoju atveju, kadangi *ŽVK* kiekis virintuve mažėja, tai, norint išlaikyti pastovų jo kiekį distiliate, reikia didinti flegmos skaičių R_d. Realiems procesams valdyti yra sukurtos periodinio veikimo rektifikacijos kolonų automatizuotojo valdymo sistemos, kurios pagal griežtai numatytą programą gali reguliuoti į koloną tiekiamos flegmos ir į virintuvą tiekiamų šildančiųjų garų kie-

kius. Pagrindinių srautų (flegmos ir distiliato) debitus galima reguliuoti pagal *ŽVK* kiekį flegmoje arba distiliate, t. y. pagal produktų kokybę.

Šio periodinės rektifikacijos kolonos darbo varianto skaičiavimas traktuojamas kaip flegmos skaičiaus kitimo intervalo ir pagrindinių rektifikacijos kolonos matmenų nustatymas.



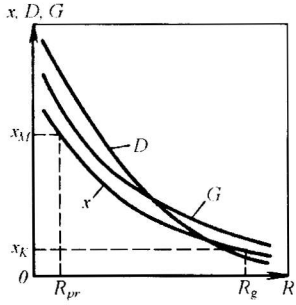
18.26 pav. Grafinis koncentracijos kitimo teorinių pakopų (lėkščių) skaičiaus $n_T = 1, 2, 3, \ldots$ (*a*) ir likučio koncentracijos $x_{K_1}, x_{K_2}, x_{K_3}, \ldots$ (*b*), esant skirtingiems flegmos skaičiams, nustatymas

Toliau bus nagrinėjamas vienas iš galimų R dydžio kitimo intervalo ribų nustatymo būdų. Pasiekus pasirinktą virintuvo likučio sudėtį x_K, nustatomas galutinis darbinis flegmos skaičius R_g rektifikacijos pabaigoje. Tai galima padaryti vienu iš anksčiau (18.3.2 sk.) nurodytų metodų, pvz., minimizuojant funkciją $n_T(R+1) = f(R)$ ir nustatant minimalų rektifikacijos kolonos tūrį. Gavus flegmos skaičių, grafiniu būdu nustatomas teorinių koncentracijos kitimo pakopų arba laipsnių skaičius (18.26 pav.).

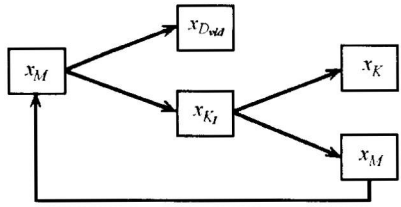
Tariama, kad, dirbant įvairiais režimais, skaičius n_T lieka pastovus ir, nekreipiant dėmesio į ant kontaktinių aparato paviršių sulaikomo skysčio kiekio kitimą, per tašką A nubrėžiama keletas darbo linijų (18.26 pav., *b*) ir tarp jų bei pusiausvyros linijos nubrėžiamas nustatytas koncentracijos kitimo pakopų arba laipsnių skaičius. Pagal *ŽVK* koncentraciją nustatomos likučio sudėtys $x_{K_1}, x_{K_2}, x_{K_3}$ ir t. t., o pagal kiekvieną darbo liniją – atitinkami nurodyti likučio kiekiai K. Braižoma likučio sudėties x_K ir flegmos skaičiaus grafinė tarpusavio priklausomybė (18.27 pav.). Analizuojant priklausomybę $x = f(R)$, nustatomas flegmos skaičius R_{pr} pradiniu perskyrimo momentu. Jis atitinka $x = x_M$. Naudojantis medžiagų balanso lygtimis:

$$M = D + K, \qquad M \cdot x_M = D \cdot x_D + K \cdot x_K, \qquad G = D \cdot (R+1),$$

18.27 pav. pavaizduojama D ir G priklausomybė kaip likučio sudėties funkcija pagal *ŽVK* laisvai pasirinktu kolonos darbo momentu. Taigi priklausomai nuo likučio sudėties, naudojantis 18.27 pav., galima tiksliai nustatyti, kiek distiliato reikia paimti nurodytu periodinės rektifikacijos momentu, kiek garų kils kolona, ir R dydį.



18.27 pav. Darbinio flegmos skaičiaus nustatymas



18.28 pav. Frakcinės rektifikacijos schema

Toliau, taikant anksčiau (16.7.2 sk.) aprašytus metodus, apskaičiuojamas kolonos aukštis ir skersmuo. Tam būtina preliminariai pasirinkti proceso trukmę ir pagal ją nustatyti reikalingą kolonos našumą, t. y. per laiko vienetą galimą paimti distiliato kiekį. Tuo atveju, kai periodinė rektifikacija atliekama palaikant pastovų flegmos skaičių ($R = const$), distiliato sudėtis ilgainiui kinta. Šis metodas dažniau naudojamas realiose pramoninėse kolonose.

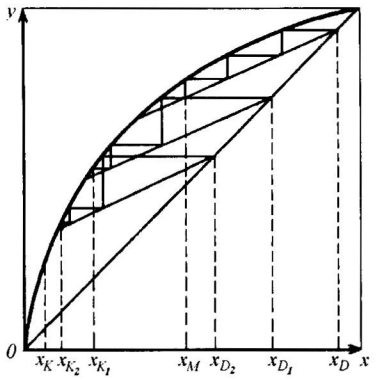
Dažniausiai atliekama vadinamoji frakcinė rektifikacija, kada gautas skirtingos sudėties distiliatas frakcijomis surenkamos atskiruose rinktuvuose. Vienas iš galimų šios schemos variantų pavaizduotas 18.28 pav.

Supylus į virintuvą sudėties x_M pagal *ŽVK* pradinį mišinį, gaunamas pasirinktos vidutinės sudėties x_D distiliatas (pirmoji frakcija) ir tarpinis sudėties x_{K_1} likutis. Toliau šis likutis šildomas ir perskiriamas į sudėties x_M frakciją ir galutinį sudėties x_K likutį. Gauta antroji frakcija tolesnio perskyrimo ciklo metu su pradiniu mišiniu supilama į virintuvą. Jei reikia, pirmąją frakciją galima perskirti į daugiau *ŽVK* turintį produktą ir sudėties x_{K_1} likutį, kuris vėl sumaišomas su pradiniu mišiniu. Taip gaunami reikiamo švarumo produktai.

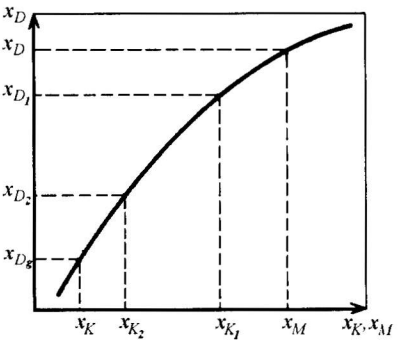
Šio periodinės rektifikacijos varianto skaičiavimas traktuojamas kaip darbinio flegmos skaičiaus pradiniu kolonos darbo momentu ir kolonos pagrindinių matmenų nustatymas. Tam pasirenkama pirmojo distiliato lašo sudėtis x_D. Vienu iš anksčiau (18.3.2 sk.) nurodytų metodų optimizuojamas dydis R. Po to pagal nustatytą R vertę brėžiama darbo linija iki pradinės skiriamojo miši-

nio sudėties $x_M = const$ ir nustatomas reikalingas koncentracijos kitimo pakopų (laipsnių) skaičius n_T. Frakcijų vidutinei sudėčiai nustatyti braižomas distiliato ir likučio sudėčių tarpusavio priklausomybės grafikas $x_D = f(x_K)$.

Tam tikslui 18.29 pav. laisvai pasirinktus koncentracijas x_{D_1}, x_{D_2} ir t. t., brėžiamos linijos, lygiagrečios su anksčiau nubrėžta darbo linija. Tarp darbo linijų ir pusiausvyros linijos nubrėžus n_T teorinių koncentracijos kitimo pakopų, nustatomos likučio sudėtys x_{K_1}, x_{K_2} ir t. t. Tokia priklausomybė tarp x_D ir x_K pavaizduota 18.30 pav.



18.29 pav. Likučio sudėčių, atitinkančių distiliato sudėtis x_{D_1}, x_{D_2} ir t. t., nustatymas, pasirinkus teorinių pakopų skaičių n_T (čia $n_T = 3$)



18.30 pav. Distiliato ir likučio sudėčių tarpusavio priklausomybė

Naudojantis 18.30 pav., priklausomai nuo paimamų frakcijų kiekio, galima nustatyti šių frakcijų sudėtis, jų vidutinę sudėtį apskaičiuojant pagal lygtį:

$$(x_D)_{vid} = \left[1/(x_{D_1} - x_{D_2})\right] \cdot \int_{x_{D_2}}^{x_{D_1}} x_D \cdot dx. \qquad (18.38)$$

Paimamos distiliato frakcijos kiekis D nustatomas pagal medžiagų balanso lygtį, neskaitant kolonoje pasiliekančio skysčio kiekio:

$$M = D + K, \qquad (18.39)$$

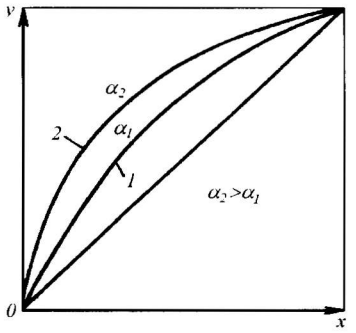
$$ln(M/K) = \int dx/(x_D - x); \qquad (18.40)$$

čia M – pradinis mišinio kiekis virintuve; K – momentinis mišinio kiekis virintuve.

Tolesnė proceso analizė ir kolonos skaičiavimas atliekamas taip pat, kaip ir tada, kai kolona dirba esant $x_D = const$.

18.5. Ekstrakcinė ir azeotropinė rektifikacija

Ar galima perskirti artimas virimo temperatūras turinčių komponentų mišinius, nustatoma naudojant santykinio lakumo koeficientą $\alpha = P_A/P_B$. Jeigu α vertė nedidelė, tai tokį mišinį galima perskirti, sudarant vakuumą. Dažnai ekonomiškai tikslinga yra naudoti papildomą (vadinamą skiriančiuoju) komponentą, skirtingai veikiantį pradinio mišinio komponentų savybes.



18.31 pav. Pradinio perskiriamojo mišinio pusiausvyros linijos: be skiriančiojo komponento (*1*) ir su jo priedu (*2*)

Kai skiriančiojo komponento virimo temperatūra aukštesnė už abiejų komponentų virimo temperatūras ir jame gerai tirpsta tik vienas iš pradinio mišinio komponentų, o kitas visai netirpsta arba tik iš dalies tirpsta, tai dėl šio skiriančiojo komponento įtakos sumažėja mišinio netirpaus komponentų sąveikos su kitais komponentais jėgos ir padidėja jo santykinis lakumas sistemoje (18.31 pav.).

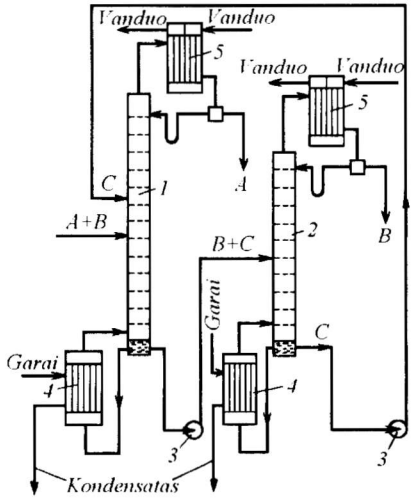
Taigi skiriantysis komponentas *ŽVK* garų slėgį padidina daugiau negu *AVK*. Staigiai padidėjus α, lengviau perskiriami pradiniai komponentai, bet po perskyrimo likutyje pasilieka vieno komponento tirpalas skiriančiajame komponente. Norint perskirti šį virintuve likusį tirpalą, reikia atlikti papildomus veiksmus, pvz., pakartotinai rektifikuoti.

Aprašytas pradinio mišinio perskyrimo metodas vadinamas ekstrakcine rektifikacija. Ekstrakcinės rektifikacijos schema pavaizduota 18.32 pav.

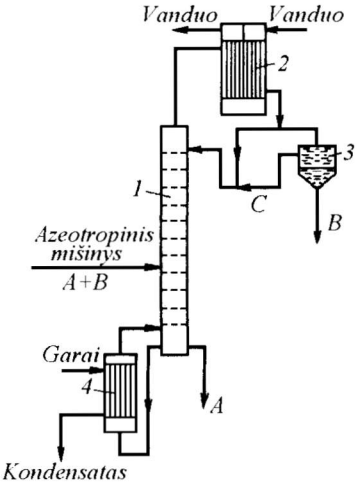
Komponentų *A* ir *B* pradinis mišinys tiekiamas į pirmosios ekstrakcinės rektifikacijos kolonos maitinimo lėkštę. Šiek tiek aukščiau maitinimo lėkštės tiekiamas pagalbinis arba skiriantysis komponentas *C*. *ŽVK (A)* paimamas kaip distiliatas, o *AVK (B)* ir skiriančiojo komponento *C* mišinys iš pirmos kolonos virintuvo perskirti tiekiamas į antrąją koloną. Skiriantysis komponentas, kaip antrosios kolonos likutis, grąžinamas pirmajai kolonai laistyti.

Azeotropine rektifikacija dažniausiai perskiriami azeotropai. Šios rektifikacijos metu atsiskiria vienas azeotropo komponentas, o antrasis su skiriančiuoju komponentu sudaro naują azeotropą, kurio virimo temperatūra žemesnė už pradinio – perskiriamojo azeotropo.

Azeotropinės rektifikacijos proceso schema, kai norima gauti bevandenį (absoliutųjį) etanolį, pateikta 18.33 pav. Kaip tirpiklis naudojamas benzenas *C*, kuris su vandeniu *B* sudaro azeotropą, kurio virimo temperatūra yra 65 °C. Kadangi etanolio *A* ir vandens azeotropo virimo temperatūra yra 78 °C, tai visas vanduo su benzenu pereina į distiliatą, iš kur benzenas nusistovėjimo rezervuare *3* atskiriamas nuo vandens ir vėl grąžinamas į koloną kaip flegma. Bevandenis etanolis pašalinamas iš kolonos *1* apatinės dalies. Jeigu tirpiklis ir atskiriamasis komponentas vienas kitame tirpsta, tai jie išskiriami atskiroje rektifikacijos kolonoje. Virintuve lieka atskiriamasis komponentas, o distiliate – tirpiklis ir dalis šio komponento. Distiliatas yra grąžinamas į azeotropinės rektifikacijos koloną.



18.32 pav. Binarinio mišinio ekstrakcinės rektifikacijos schema: *1* – ekstrakcinės rektifikacijos kolona, *2* – produkto *B* ir ekstrahuojančiojo komponento *C* perskyrimo kolona, *3* – siurbliai, *4* – virintuvai, *5* – deflegmatoriai



18.33 pav. Binarinio mišinio azeotropinės rektifikacijos schema: *1* – kolona, *2* – deflegmatorius, *3* – nusodintuvas, *4* – virintuvas

Skiriančiojo agento sąnaudos daugiausia priklauso nuo pradinio mišinio sudėties. Azeotropinės rektifikacijos metu skiriančiojo agento sąnaudos didėja, didėjant su distiliatu paimamų komponentų koncentracijai pradiniame mišinyje. Ekstrakcinės rektifikacijos metu priešingai – skiriančiojo komponento sąnaudos didėja, didėjant su likučiu paimamų komponentų koncentracijai pradiniame mišinyje.

Naudojant ekstrakcinės ir azeotropinės rektifikacijos metodus labai svarbu tinkamai parinkti skiriantįjį komponentą, kuris turi tenkinti tokius reikalavimus: 1) turi kaip galima daugiau padidinti skiriamųjų komponentų santykinį lakumą; 2) turi būti lengvai regeneruojamas; 3) gerai tirpinti skiriamus komponentus, kad kolonoje esančiose temperatūrose skysčiai nesisluoksniuotų. Juo gali būti organinės kilmės tirpikliai arba kietų medžiagų (pvz., druskų) tirpalai. Ekstrakcinei rektifikacijai gali būti naudojamos ir kietos medžiagos (druskos).

Jeigu kaip skiriantysis agentas naudojami kietų medžiagų tirpalai, tai toks procesas vadinamas išsūdymu, arba druskine rektifikacija.

18.6. Rektifikacijos aparatų skaičiavimo ypatumai

Technologiniai rektifikacijos kolonų skaičiavimai iš principo nesiskiria nuo kitų masės mainų aparatų skaičiavimų ir remiasi 16-oje ir 17-oje dalyse išdėstytais dėsningumais. Tačiau rektifikacijos procesas sudėtingesnis negu absorbcijos, kadangi rektifikacijos metu vykstantis masės mainų procesas yra lydimas šilumos pernešimo. Gali atrodyti, kad rektifikacijos proceso greitis priklauso tik nuo šilumos tiekimo perskiriamajam mišiniui greičio. Tačiau iš tikrųjų yra ne taip. Aišku, rektifikacijos procesas netiekiant šilumos iš šalies nevyks. Bet proceso greitis bei efektyvumas, kaip ir kito kurio nors masės mainų proceso metu, paprastai priklauso nuo masės pernešimo tarp fazių greičio, t. y. nuo masės atidavimo greičio fazėse. Todėl rektifikacijai galioja visi 16-oje dalyje išdėstyti dėsningumai – proceso hidrodinaminių sąlygų, fazių fizikinių savybių ir kitų veiksnių įtaka; procesą ribojančios stadijos nustatymas, jo varos jėgos apskaičiavimas ir t. t.

Masės ir šilumos mainų bendrumas yra specifinis rektifikacijos procesui, ir tai apsunkina jo analizę bei skaičiavimą:

1) likučio virimo temperatūra aukštesnė už distiliato (ir, aišku, flegmos) virimo temperatūrą. Kai šios temperatūros labai skirtingos, jos turi nemaža įtakos masės pernešimui (garuose padaugėja *ŽVK*, flegmoje – *AVK*);

2) kai kada gali gerokai keistis fazių fizikinės savybės kolonos aukštyje, ir tai gali paveikti ne tik masės pernešimo greitį, bet net ir fazių kontakto paviršiaus plotą (pablogėja arba pagerėja įkrovos drėkinamumas, keičiasi burbuliuko dydis ir t. t.). Pastaroji sąlyga susijusi su skysčio paviršiaus įtempio kitimu kintant jo sudėčiai ir temperatūrai;

3) jei skaičiuojant ir tiriant rektifikacijos kolonas, daroma prielaida, kad komponentų molinės garavimo šilumos yra vienodos, nukrypimai gali būti gana dideli;

4) apatinė rektifikacijos kolonos dalis darbo metu laistoma labiau negu viršutinė, todėl dažnai viršutinę ir apatinę kolonos dalis reikia skaičiuoti atskirai.

Jeigu rektifikacijai skaičiuoti naudojamos adsorbcijos procesui išvestos lygtys, tai kolonos našumas ir efektyvumas gaunamas didesnis.

18.7. Daugiakomponenčių mišinių rektifikacijos skaičiavimas

Jeigu daugiakomponentį mišinį reikia perskirti į K komponentų, tam, kaip buvo minėta 18.3.1 sk., reikia turėti $N = K - 1$ kolonų. Kiekviena kolona, kuri vadinama paprasta, skaičiuojama kaip binarinių mišinių kolona. Tada kiekvienoje kolonoje, išskyrus paskutinę, gaunamas vienas grynas komponentas, o kitose kolonose perskiriamas kitų komponentų mišinys. Paskutinėje kolonoje gaunami du beveik gryni komponentai.

Dažnai pradinio mišinio nereikia švariai suskirstyti į komponentus, pakanka gauti nurodytos sudėties frakcijas. Toks procesas atliekamas vienoje kolonoje, pagal jos aukštį paimant reikalingas komponentų frakcijas. Tokia kolona vadinama sudėtinga. Ji atitinka keletą paprastų viena ant kitos sustatytų kolonų. Tokiu atveju rektifikacijai reikalingi mažesni gamybiniai plotai ir perskiriamam mišiniui tiekti iš vienos kolonos į kitą (naudojant kelių paprastų kolonų aparatą), sudėtingoje kolonoje pakanka vieno siurblio.

Medžiagų ir šilumos srautai sudėtingoje kolonoje organizuojami beveik taip pat kaip ir paprastose kolonose, skirtose binariniams mišiniams perskirti. Tačiau, skirtingai nuo binarinių mišinių, kuriuose yra vienas *ŽVK* ir vienas *AVK*, daugiakomponenčiuose mišiniuose būna komponentų, kurių santykinis lakumas (virimo temperatūra) yra tarp *ŽVK* ir *AVK* šių parametrų verčių. Todėl daugiakomponenčių mišinių perskyrimo kolonų skaičiavimas daug sudėtingesnis negu binarinių mišinių rektifikacijos kolonų. Skaičiuojant vietoj mišinio perskyrimo į jį sudarančius komponentus galima suformuluoti užduotį iš mišinio išskirti vieną arba kelis komponentus.

Sudėtingos kolonos medžiagų ir šilumos balansų lygtys, skirstant daugiakomponenčius mišinius į frakcijas, analogiškos binariniams mišiniams išvestoms lygtims.

Medžiagų balansas pagal srautą ir i-ąjį komponentą:

$$M = D + K\ ; \tag{18.41}$$

$$M \cdot x_M = D \cdot x_D + K \cdot x_K\ . \tag{18.42}$$

Į (18.42) lygtį vietoj K įrašę M–D ir atlikę nedidelius pertvarkymus, gausime:

$$D/M = (x_{iM} - x_{iK})/(x_{iD} - x_{iK}) = \varepsilon\ ; \tag{18.43}$$

čia $\varepsilon = D/M$ – savitasis distiliato paėmimas.

Analogiškai, kai mišinys yra kelių komponentų,

$$\varepsilon = \left(\sum_{i=1}^{k} x_{iM} - \sum_{i=1}^{k} x_{iK}\right) \Big/ \left(\sum_{i=1}^{k} x_{iD} - \sum_{i=1}^{k} x_{iK}\right). \qquad (18.43a)$$

Savitasis virintuvo likučio paėmimas atitinkamai lygus:

$$1 - \varepsilon = K/M = 1 - D/M = (x_{iD} - x_{iM})/(x_{iD} - x_{iK}), \qquad (18.44)$$

arba komponentų mišinio

$$1 - \varepsilon = K/M = 1 - D/M = \left(\sum_{i=1}^{k} x_{iD} - \sum_{i=1}^{k} x_{iM}\right) \Big/ \left(\sum_{i=1}^{k} x_{iD} - \sum_{i=1}^{k} x_{iK}\right). \qquad (18.44a)$$

Skaičiuojant turi būti išlaikoma sąlyga

$$\sum x_{iD} = \sum x_{iK} = \sum x_{iM} = 1. \qquad (18.45)$$

Medžiagų balansas viršutinėje ir apatinėje sudėtingos kolonos dalyse gali būti išreikštas atitinkamos kolonos dalies darbo linijų lygtimis (18.32d) ir (18.33d). Daugiakomponenčių mišinių rektifikacijai apskaičiuoti būtina turėti pusiausvyros lygtį (18.8), taip pat šilumos balanso lygtis (18.35)...(18.37).

Turint medžiagų, šilumos balansų ir pusiausvyros lygčių sistemą, galima apskaičiuoti visus daugiakomponenčių mišinių perskyrimo parametrus, tačiau dėl tam tikrų daugiakomponenčių mišinių rektifikacijos savitumų šis uždavinys paprastai yra sprendžiamas iteracijos metodais, naudojant kompiuterius. Savitumai yra šie:

1) iš skaičiuojamų koncentracijų galima nurodyti tik dvi, pavyzdžiui, bet kurio komponento arba komponentų suminę koncentraciją distiliate ir likutyje. Kitiems komponentams galima taikyti tik apribojimą „daugiau arba mažiau" ir pagal medžiagų ir šilumos bei pusiausvyros lygtis iteracijos metodais nustatyti produktų sudėtį;

2) bet kuriame kolonos skerspjūvyje flegmos ir garų srautų sudėtys nėra identiškos skysčio ir garų, gautų vieną kartą išgarinus žaliavas, sudėtims. Todėl flegmos ir garų sudėtys konkrečiame kolonos skerspjūvyje m gali būti tiksliai nustatytos tik atlikus atitinkamos kolonos dalies skaičiavimus ir nustačius nuo viršutinės kolonos dalies pirmosios lėkštės nutekančios flegmos sudėtis (x_i) bei iš apatinės kolonos dalies kylančių garų sudėtį y_i;

3) tarpinių virimo temperatūrų komponentų koncentracijos pagal sudėtingos kolonos aukštį gali turėti maksimumą arba minimumą.

Naudojami ir supaprastinti skaičiavimo metodai, kurie remiasi prielaidomis, pvz., kad flegmos skaičius ir santykinis lakumas visame vienos arba kitos kolonos dalies aukštyje yra pastovūs, arba panaudojamos empirinės flegmos skaičiaus ir teorinių lėkščių skaičiaus tarpusavio priklausomybės ir t. t.

Tarsime, kad komponentai, kurių koncentracija perskyrimo produktuose – distiliate ir likutyje – yra žinoma, vadinami pagrindiniais. Perskiriamojo mišinio sudėtyje gali būti komponentų, kurių lakumo vertės yra tarp *ŽVK* ir *AVK* lakumo verčių. Šie komponentai perskyrimo metu vadinami paskirstomaisiais ir taip pat patenka į distiliatą ir likutį. Priešingai, skiriamajame mišinyje gali būti komponentų, kurių lakumas didesnis arba mažesnis už pagrindinių komponentų lakumą. Po perskyrimo tokių komponentų koncentracija viename iš produktų būna artima nuliui ir todėl tokie komponentai vadinami nepaskirstomaisiais.

18.7.1. Ištisinio laistymo ($R \to \infty$) rektifikacijos proceso skaičiavimas

Skaičiavimo pagrindai. Kai kolonos darbo metu palaikomas be galo didelis flegmos skaičius, tai procesui atlikti reikalingas minimalus teorinių lėkščių skaičius (n_{min}). Esant idealiems mišiniams, n_{min} apskaičiuojamas pagal Fenskė lygtį:

$$n_{min} = \frac{lg\left[\left(x_{iD}/x_{iK}\right)/\left(x_{jD}/x_{jK}\right)\right]}{lg\left(\alpha_i/\alpha_j\right)} - 1 = \frac{lg\left(\psi_i/\psi_j\right)}{lg\left(\alpha_{i,j}\right)} - 1; \qquad (18.46)$$

čia $\psi_i = x_{iD}/x_{iK}$, $\psi_j = x_{jD}/x_{jK}$ – atitinkamo komponento pasiskirstymo tarp distiliato ir likučio koeficientas; $\alpha_{i,j} = \alpha_i/\alpha_j$ – komponentų i, j santykinio lakumo koeficientas (pirmam priartėjimui laikoma, kad jie pastovūs).

Jeigu deflegmatoriuje ne visi garai kondensuojasi, tai dešinėje (18.46) lygties pusėje vienetą reikia pakeisti dvejetu.

Tiksliau skaičiuojant, imama vidutinė santykinio lakumo koeficiento vertė:

$$\overline{\alpha}_{i,j} = \left[\left(\alpha_{i,j}\right)_D \cdot \left(\alpha_{i,j}\right)_M \cdot \left(\alpha_{i,j}\right)_K\right]^{1/3}. \qquad (18.47)$$

Galima daryti prielaidą, kad perskiriamasis mišinys yra realus arba hipotetinis. Komponento j pasiskirstymo koeficientas lygus 1, t. y. $\psi_j = 1$. Pasiskirstymo koeficientas atitinka kokią nors temperatūrą t_{dr}. Tada komponentai, kurių virimo temperatūra (esant garų slėgiui kolonoje P) žemesnė už t_{dr}, daugiausia kaupsis distiliate, o komponentai, kurių virimo temperatūra aukštesnė už t_{dr}, likutyje. Taigi temperatūra t_{dr} nusako mišinio pasiskirstymo tarp distiliato ir likučio ribą. Šiuo atveju $\psi_j = 1$.

Pažymėjus i-ojo komponento lakumą j-ojo komponento lakumo atžvilgiu simboliu $\alpha_{i,j}$, (18.46) lygtį galima užrašyti taip:

$$n_{min} = (lg\psi_i / lg\alpha_{i,t}) - 1. \qquad (18.48)$$

Kai slėgis kolonoje yra P, o temperatūra t_{dr}, $\alpha_{i,t}$ vertes galima nustatyti iš santykio $\alpha_{i,t} = P_{i,t_M} / P$ arba iš empirinės Melporderio ir Chidingtono lygties:

$$lg\,\alpha_{i,t} = \frac{t_i - t_{dr}}{273 + t_{dr}} \cdot \left(7{,}3 - 1{,}15 \cdot lg\,P + \frac{273 + t_{dr}}{179 \cdot lg\,P}\right); \qquad (18.49)$$

čia $t_i - t_{dr}$ – i-ojo ir j-ojo komponentų virimo temperatūrų, esant slėgiui P, skirtumas; P – slėgis sistemoje, mm Hg.

Reikia pasakyti, kad (18.48) lygtis tinka kiekvienam mišinio komponentui ir k-ajam komponentui galima užrašyti:

$$n_{min} = (lg\psi_k / lg\alpha_{k,t}) - 1. \qquad (18.50)$$

Tada $$(lg\psi_i / lg\alpha_{i,t}) = (lg\psi_k / lg\alpha_{k,t}); \qquad (18.51)$$

iš čia

$$\psi_i = x_{iD} / x_{iK} = \psi_k^{lg\,\alpha_{i,t}/lg\,\alpha_{k,t}}. \qquad (18.52)$$

Iš šios lygties galima nustatyti Ψ_i vertę ir atitinkamai distiliato ir likučio sudėtis.

Taigi galima daryti išvadą, kad norint nustatyti distiliato ir likučio sudėtis, komponentų pasiskirstymo koeficientams ψ rasti reikia žinoti arba nustatyti mišinio dalybos ribos temperatūrą t_{dr}. Tam galima panaudoti medžiagų balanso lygtį (18.43), įvertinus $\psi_i = x_{iD} / x_{iK}$. Tada

$$x_{iD} = x_{iM} \cdot \psi_i / [1 + \varepsilon \cdot (\psi_i - 1)], \qquad (18.53)$$

$$x_{iK} = x_{iM} / [1 + \varepsilon \cdot (\psi_i - 1)]. \qquad (18.54)$$

Pasinaudodami (18.45) lygtimi, gausime:

$$\sum_i \{x_{iM} \cdot \psi_i / [1 + \varepsilon \cdot (\psi_i - 1)]\} = 1; \qquad (18.55)$$

$$\sum_i \{x_{iM} / [1 + \varepsilon \cdot (\psi_i - 1)]\} = 1. \qquad (18.56)$$

Naudojantis (18.55), (18.56) lygtimis, įvertinant $\alpha_{i,t}$ temperatūrinę priklausomybę (18.49), nuoseklaus priartėjimo metodu galima nustatyti t_{dr}.

Skaičiavimo metodika. Pagrindinės skaičiavimo stadijos:

1) parinkus dydį t_{dr}, pagal (18.49) lygtį apskaičiuojami visų mišinio komponentų santykinio lakumo koeficientai;

2) pasirinkus k-ojo komponento pasiskirstymo koeficientą pagal (18.52) lygtį apskaičiuojami pasiskirstymo koeficientai ψ_i;

3) pagal (18.53), (18.54) lygtis apskaičiuojamos produktų sudėtys ir patikrinama, ar tenkinamos (18.55) ir (18.56) lygčių sąlygos.

Jeigu pasirinktu tikslumu šios sąlygos yra tenkinamos, tai temperatūra t_{dr} pasirinkta teisingai. Jeigu ne – skaičiavimai kartojami, esant naujai t_{dr} vertei. Skaičiavimais nustatomos visos distiliato x_{iD} ir likučio x_{iK} sudėtys, kai kolona dirba režimu $R \to \infty$. Jeigu mišinyje yra nepasiskirsčiusių komponentų, pvz., turinčių didelį santykinį lakumą ($\alpha_{l,t} \to \infty$), tai jų kiekis likutyje bus artimas nuliui, o jų koncentracija distiliate $x_{lD} = x_{lM}/\varepsilon$. Jeigu mišinyje yra m neperskiriamųjų komponentų, kurių santykinis lakumas mažas ($\alpha_{m,t} \to 0$), tai jų koncentracija distiliate artima nuliui, o kiekis likutyje $x_{mK} = x_{mM}/(1-\varepsilon)$. Skaičiuojant pradiniai duomenys gali būti bet kokios dvi komponentų koncentracijos distiliate ir likutyje arba tik viena koncentracija (distiliate arba likutyje) ir n_{min}.

Darant prielaidą, kad tam tikras lėkščių skaičiaus ir flegmos skaičiaus kitimas beveik neturi įtakos distiliato ir likučio sudėčiai, tada sudėtis, nustatytas, kai $R \to \infty$, galima panaudoti lėkščių skaičiui, flegmos skaičiui, šildalo sąnaudoms ir t. t. nustatyti.

Minimalaus flegmos skaičiaus nustatymas. Minimalus flegmos skaičius daugiakomponentei rektifikacijai nustatomas keletu būdų. Dažniausiai šiam tikslui naudojamas Andervudo metodas, kuris remiasi prielaida, kad garų moliniai debitai visuose kolonos skerspjūviuose yra pastovūs, o komponentų lakumas nepriklauso nuo temperatūros.

Bendruoju atveju visi mišinio komponentai suskirstomi į tris grupes. Pirmą grupę sudaro neperskiriamieji žemos virimo temperatūros komponentai, antrą – perskiriamieji, o trečią – neperskiriamieji aukštos virimo temperatūros komponentai. Taigi pagrindiniai mišinio komponentai visada yra antroje grupėje ir joje komponentų negali būti mažiau kaip du. Praktikoje labiausiai paplitęs atvejis, kada tik pagrindiniai komponentai yra perskiriamieji, o visi kiti – neperskiriamieji ir priskiriami pirmajai arba trečiajai grupėms.

Andervudo santykiai, gauti kartu išsprendus medžiagų balanso ir pusiausvyros lygtis, užrašomi taip:

$$\sum_i [\alpha_i \cdot x_{iM}/(\alpha_i - F)] = 1 - q; \qquad (18.57)$$

$$\sum_i [\alpha_i \cdot x_{iD}/(\alpha_i - F)] = R + 1; \qquad (18.58)$$

čia α_i – mišinio komponentų santykinio lakumo koeficientai, nustatomi, kai temperatūra lygi pradinio mišinio temperatūrai; Φ – (17.57) lygties šaknis; q – skystosios fazės dalis pradiniame mišinyje (tuo atveju, kai pradinis miši-

nys perskirti tiekiamas perkaitintųjų garų pavidalu, $q < 0$; jeigu pradinis mišinys (skystis) perskirti tiekiamas pašildytas ne visai iki virimo temperatūros, $q > 1$; kai pradinis mišinys (skystis) perskirti tiekiamas pašildytas iki virimo temperatūros, $q = 1$); R_{min} – minimalus flegmos skaičius.

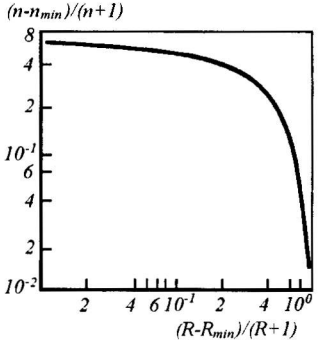
Nustatant R_{min} iš (18.58) lygties, Φ yra pagrindinių komponentų α verčių intervale.

Panagrinėsime, kaip Andervudo metodas taikomas keturių komponentų mišiniui, kuriame pagrindiniai yra antrasis ir trečiasis komponentai, atitinkamai aukštos ir žemos virimo temperatūros, o pirmasis ir ketvirtasis komponentai nepaskirstomieji, – atitinkamai aukštos ir žemos virimo temperatūros. Taigi pirmoje grupėje yra tik ketvirtasis komponentas, antroje – antrasis ir trečiasis, o trečioje – tik pirmasis komponentas.

Andervudo lygtys nagrinėjamu atveju bus užrašomos taip:

$$\sum_{i=1}^{4}\left[\alpha_i \cdot x_{iM}/(\alpha_i - \Phi)\right] = 1 - q\,; \qquad (18.57a)$$

$$\sum_{i=2}^{4}\left[\alpha_i \cdot x_{iD}/(\alpha_i - \Phi)\right] = R_{min} + 1\,. \qquad (18.58a)$$



18.34 pav. Teorinių lėkščių skaičiaus priklausomybė nuo flegmos skaičiaus

Apytikslis flegmos skaičiaus ir lėkščių skaičiaus nustatymo metodas. Apytiksliams skaičiavimams dažnai naudojama Džillilendo koreliacija, gauta apibendrinant didelį kiekį eksperimentų metu gautų duomenų (18.34 pav.).

Naudojant šią priklausomybę ir žinant R_{min} ir $n_{min}\,(R \to \infty)$, pasirenkamas flegmos skaičius $(R_{min} < R < R \to \infty)$ ir nustatomas teorinių lėkščių skaičius. Kaip optimumo kriterijų naudojant sandaugą $n \cdot (R+1)$ arba $(n+1)\cdot(R+1)$, Džillilendo koreliacijos pagrindu galima gauti tokias lygtis optimaliam flegmos skaičiui R_{opt} ir lėkščių skaičiui n_{opt} apskaičiuoti:

$$R_{opt} = 1{,}35 \cdot R_{min} + 0{,}35\,; \qquad (18.59)$$

$$n_{opt} = 1{,}7 \cdot n_{min} + 0{,}7\,. \qquad (18.60)$$

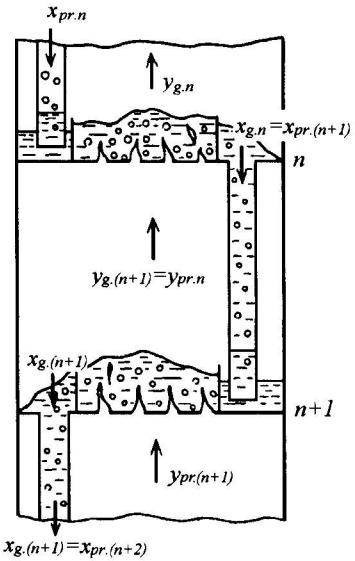
Pradinio mišinio tiekimo perskirti vietai nustatyti naudojamas apytikslis santykis

$$n_v/n_a = n_v/(n-n_a) = n_{min\,v}/n_{min\,a} = n_{min\,v}/(n_{min} - n_{min\,a}); \quad (18.61)$$

čia n_v ir n_a – lėkščių skaičius atitinkamai viršutinėje ir apatinėje kolonos dalyje; $n_{min\ v}$ ir $n_{min\ a}$ – tie patys parametrai, kai $R \to \infty$. $n_{min\ v}$ ir $n_{min\ a}$ vertės atitinkamoje kolonos dalyje apskaičiuojamos pagal Fenskė lygtį (18.46).

18.7.2. Rektifikacijos proceso skaičiavimas nuoseklių priartėjimų (nuo lėkštės prie lėkštės) metodu

Skaičiavimams supaprastinti daromos prielaidos, mažai iškreipiančios proceso fizikinę esmę:



18.35 pav. Garų ir skysčio koncentracijos gretimose lėkštėse

1) lėkštėje skystis visiškai (idealiai) susimaišo;
2) garų ir skysčio debitai kolonoje nesikeičia (yra vienodi visuose skerspjūviuose);
3) deflegmatoriuje ir virintuve garų ir skysčio sudėtys nesikeičia.

Kolonoje dviem gretimoms lėkštėms suteikiami numeriai n ir $n+1$ (18.35 pav.). Bus atliekami i-ojo komponento skaičiavimai. Užrašymui suprastinti visose lygtyse komponento numeris i praleidžiamas.

Užrašomos kiekvieno i-ojo mišinio komponento darbo linijos abiejose kolonos dalyse (18.32) (18.33) ir pusiausvyros (18.8) lygtys. Flegmos darbinis skaičius pasirenkamas pagal anksčiau aprašytą metodiką iš intervalo $R_{min} \ldots R \to \infty$.

Pagal medžiagų balansą ir i-ojo komponento masės pernešimą n-oje lėkštėje gaunama tokia lygtis:

$$V \cdot (y_{gn} - y_{pn}) = K_{yS} \cdot S \cdot \frac{(y_n^* - y_{pn}) - (y_n^* - y_{gn})}{ln\left[(y_n^* - y_{pn})/(y_n^* - y_{gn})\right]}, \quad (18.62)$$

arba

$$ln\left[(y_n^* - y_{pn})/(y_n^* - y_{gn})\right] = K_{yS} \cdot S/V; \quad (18.63)$$

čia V – garų debitas kolonoje, mol/s; S – barbotavimo paviršiaus plotas lėkštėje, m^2; y_n^* – i-ojo komponento koncentracija garuose, pusiausviruose su n-ojoje lėkštėje esančiu skysčiu, mol/mol.

Įvertinus pusiausvyros ir darbo linijų lygtis pagal šį komponentą, iš (18.63) lygties galima nustatyti funkcinę priklausomybę tarp x_{gn} ir y_{gn}, esant žinomoms V, S ir K_{yS} vertėms. Nustačius pagal pradinius duomenis garų debitą V ir pasirinkus lėkščių konstrukciją, lėkštės barbotažo paviršius nustatomas pagal anksčiau aprašytą (žr. 16.7.2 sk.) standartinę schemą: $V \rightarrow K \rightarrow D \rightarrow S$.

i-ojo komponento masės perdavimo koeficientas apskaičiuojamas pagal fazių pasipriešinimų adityvumo lygtį, į kurią įeinantys masės atidavimo koeficientai β_{yS} ir β_{xS}, apskaičiuojami pagal atitinkamas kriterijų arba empirines lygtis, o i-ojo komponento pasiskirstymo koeficientas m – pagal santykį

$$m = K_{xS}/K_{yS} = \Delta y_{vid}/\Delta x_{vid}\,; \tag{18.64}$$

$$\text{čia } \Delta x_{vid} = \frac{\left(x_{pn} - x_{pn}^*\right) - \left(x_{gn} - x_{gn}^*\right)}{ln\left[\left(x_{pn} - x_{pn}^*\right)/\left(x_{gn} - x_{gn}^*\right)\right]}. \tag{18.65}$$

Reikia prisiminti, kad (18.63) lygtys, iš kurių galima nustatyti priklausomybę tarp lėkštę paliekančių garų ir skysčių sudėčių y_{gn} ir x_{gn}, turi būti sudarytos visiems mišinio komponentams. Po to, naudojantis darbo linijos lygtimi, nustatoma garų, paliekančių žemiau esančią lėkštę $y_{g(n+1)} = y_{pn}$, sudėtis, ir t. t.

Skaičiavimai atliekami, pasirinkus distiliato ir likučio virintuve sudėtis nuo viršutinės ir apatinės kolonos lėkščių iki maitinimo lėkštės. Į apatinę lėkštę įtekančių ir iš viršutinės lėkštės ištekančių garų koncentracijos žinomos ir atitinkamai lygios pasirinktoms likučio ir distiliato sudėtims. Distiliato ir likučio virintuve sudėtys parenkamos ir apskaičiuojamos, kol maitinimo lėkštės medžiagų balansai pagal visus komponentus sutampa.

Pavyzdžiui, i-ojo komponento maitinimo lėkštės balansas

$$M \cdot x_M + L \cdot x_{nM} + V \cdot y_{gM} = V \cdot y_{gM} + (L + M) \cdot x_{gM}. \tag{18.66}$$

Rektifikacijos proceso reguliavimas. Rektifikacijos procesas reguliuojamas įvairiai: keičiant į koloną tiekiamos flegmos ir virintuvui suteikiamos šilumos kiekį, taip pat keičiant į koloną tiekiamo tirpalo kiekį bei sudėtį ir iš virintuvo išleidžiant atitinkamą kiekį tirpalo. Apie pasikeitusį režimą galima spręsti iš temperatūros pasikeitimo kolonos viršutinėje ir apatinėje dalyje, slėgio skirtumo ir kitų parametrų.

Rektifikacijos proceso reguliavimą stengiamasi kuo daugiau automatizuoti. Yra sukurta labai įvairių automatizavimo schemų: a) pagal temperatūrą

apatinėje kolonos dalyje arba slėgį virintuve reguliuojamas kaitinimo garų tiekimas į virintuvą; b) pagal temperatūrą viršutinėje kolonos dalyje reguliuojamas distiliato ištekėjimo greitis; c) pagal skysčio aukštį virintuve reguliuojamas likučio nutekėjimo iš virintuvo greitis. Periodinis rektifikacijos procesas reguliuojamas automatiškai, didinant flegmos skaičių R, kad iš kolonos išleidžiamo distiliato sudėtis nesikeistų (t. y. $x_D = const$).

19 DALIS

EKSTRAKCIJA

19.1. Ekstrakcijos proceso fizikiniai pagrindai

Ekstrakcija yra procesas, kuriuo iš vienos skystosios fazės L_1 (pradinio tirpalo) kita skystąja faze V_1 (ekstrahentu) išgaunama ištirpusi medžiaga A arba medžiagų grupė (ekstraktyvas), kai šios dvi fazės viena kitoje beveik netirpsta arba silpnai tirpsta, bet tirpina ekstraktyvą. Ekstrakcijos procesas vyksta ne tik sistemoje *skystis-skystis*, bet ir sistemoje *kieta medžiaga-skystis*. Šiuo atveju skystu tirpikliu V_1 (ekstrahentu), selektyviai tirpinančiu tiktai ekstrahuojamus komponentus, iš kietosios medžiagos išgaunamas ekstraktyvas. Kai ekstrakcijai iš kietųjų medžiagų kaip ekstrahentas naudojamas vanduo, ekstrakcijos procesas vadinamas išplovimu. Šioje vadovėlio dalyje apsiribojama vien tik ekstrakcijos proceso nagrinėjimu sistemoje *skystis-skystis*, kai liečiasi dvi skystosios fazės (ekstrakcija iš skysčių).

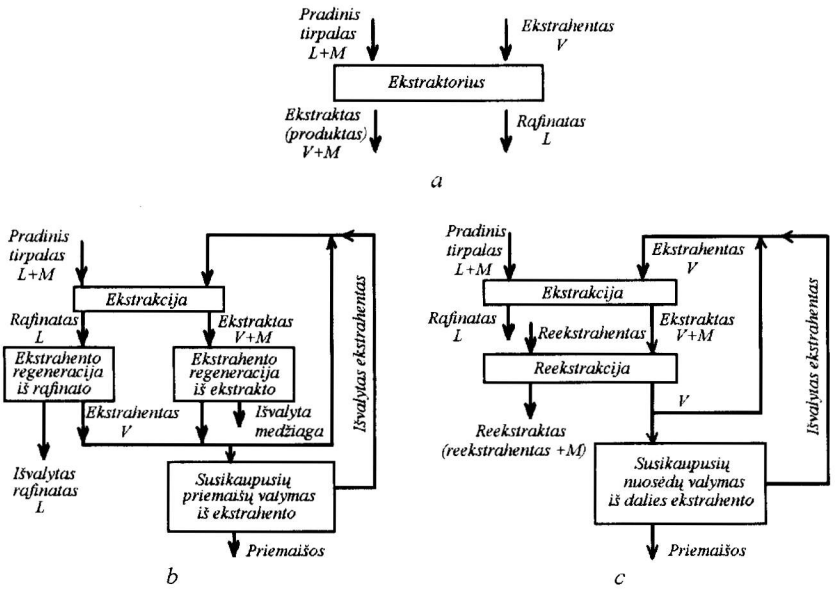
Ekstrakcijos procesas sistemose *skystis-skystis* gana plačiai taikomas įvairiose cheminės technologijos, farmacijos, hidrometalurgijos ir kitose pramonės šakose, pvz., šalinant iš divinilo acetaldehidą ir kitas priemaišas, kaprolaktano ir kitų organinės sintezės produktų gamyboje, taip pat gaminant branduolinį kurą, antibiotikus. Ekstrakcija iš tirpalų arba pramoninių vandenų išgaunamos vertingos arba toksiškos medžiagos arba gaunami jų koncentruoti tirpalai.

Ekstrakcija iš skysčių kartu su distiliacija bei rektifikacija yra pagrindiniai skystų vienalyčių sistemų perskyrimo metodai. Ekstrakcija ekonomiškesnė, pvz., už rektifikaciją, kai reikia perskirti tirpalus, kuriuose maža komponento koncentracija, nes nereikia išgarinti viso skysčio. Be to, ekstrahuoti tikslinga tada, kai šildomas tirpalas skyla. Dažnai naudojamas ekstrakcijos iš skysčių ir rektifikacijos derinys. Rektifikacija, šildymas, garinimas ir panašūs metodai naudojami tirpikliui arba ekstrahentui regeneruoti. Ekstrahento ir pradinio tirpalo tankiai turi būti skirtingi.

Ekstraktyvo tirpalas ekstrahente vadinamas ekstraktu, o pradinio tirpalo likutis po ekstrakcijos – rafinatu.

19.1 pav. pavaizduotos pagrindinės ekstrakcijos schemos. Pagal ekstrakcijos neregeneruojant ekstrahento schemą (19.1 pav., *a*) pradinis tirpalas (fazė *L+M*) ir ekstrahentas (fazė *V*) tiekiami į ekstrakcijos aparatą – ekstraktorių, kuriame medžiaga *M* pereina iš fazės *L* į fazę *V*. Gaunamas ekstraktas (fazė *V+M*) ir rafinatas (fazė *L*). Ekstrakcija neregeneruojant ekstrahento naudojama labai retai.

Ekstrakcijos regeneruojant ekstrahentą schema (19.1 pav., *b*) naudojama dažniau. Pagal šią schemą ekstrahentas regeneruojamas iš ekstrakto ir rafinato, jeigu ekstrahentas iš dalies jame tirpsta. Išvalytas ekstrahentas pakartotinai grąžinamas į ekstrakcijos procesą.



19.1 pav. Ekstrakcijos schemos: *a* – kai ekstrahentas neregeneruojamas, *b* – kai ekstrahentas regeneruojamas, *c* – ekstrakcijos ir reekstrakcijos derinys

Pagal schemą (19.1 pav., *c*) po ekstrakcijos vyksta grįžtamasis procesas, kuris vadinamas reekstrakcija. Šiuo atveju regeneruojama fazė apdorojama reagentų tirpalais, kurie priverčia tikslinį produktą kaip galima daugiau pereiti į vandeninį tirpalą arba nuosėdas ir gautą tirpalą sukoncentruoja. Reekstrakcijos metu gautas produktas vadinamas reekstraktu.

Kadangi ekstrakcija susijusi su ekstrahento dėjimu į perskiriamąjį tirpalą, neišvengiamai susidaro sąlygos užteršti produktus, todėl po perskyrimo juos būtina valyti. Tai pabrangina patį ekstrakcijos procesą. Dėl šio trūkumo ekstrakcija naudojama ribotai.

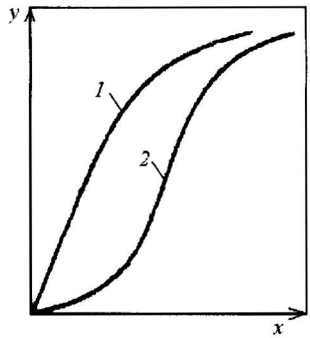
19.2. Sistemos *skystis-skystis* pusiausvyra

Pagal Gibso taisyklę $C = K - F + n$, ekstrahuojant iš skysčių, paprastai temperatūra nesikeičia, o slėgis sistemos *skystis-skystis* pusiausvyrai beveik neturi įtakos. Todėl $n = 0$. Tada trijų komponentų – dviejų skysčių ir skiriamosios medžiagos sistemai $C = 1$ ($K = 3$, $F = 2$, $n = 0$), o jos koncentraciją, neišardant pusiausvyros, galima keisti tik vienoje iš fazių. Šiuo atveju $y^* = f(x)$, t. y. paskirstomos medžiagos koncentraciją x vienoje iš fazių, esant pusiausvyrai, atitinka tos pačios medžiagos koncentracija y kitoje fazėje. Šis ryšys pavaldus vadinamajam paskirstymo dėsniui: tarp dviejų pusiausvirų skystųjų fazių paskirstomos medžiagos koncentracijų jose santykis, esant pastoviai temperatūrai, yra pastovus dydis:

$$m = y^*/x \quad (19.1) \qquad \text{arba} \qquad y^* = m \cdot x; \quad (19.1a)$$

čia y^* ir x – pusiausviros paskirstomosios medžiagos koncentracijos atitinkamai ekstrakte ir rafinate, santykiniais vienetais; m – pasiskirstymo koeficientas.

Koordinatėse y–x, esant pastoviai temperatūrai ir slėgiui, gaunama paprasta plokštuminė diagrama, kurioje pusiausvyros linija yra tiesė, einanti per koordinačių pradžią. Tačiau dydis m yra pastovus tik tuomet, kai procese dalyvaujančios fazės tarpusavyje visiškai netirpsta, o tokie atvejai realiuose procesuose retai pasitaiko. Paprastai m vertė priklauso nuo pasiskirsčiusios medžiagos koncentracijos net esant pastoviai temperatūrai. Pasiskirstymo dėsnio nukrypimo nuo tiesinio priežastis gali būti ištirpusios medžiagos asociacija arba disociacija vienoje arba abiejose fazėse. Jeigu tuo pačiu metu kinta ir temperatūra, tai m vertė gali dar labiau keistis.



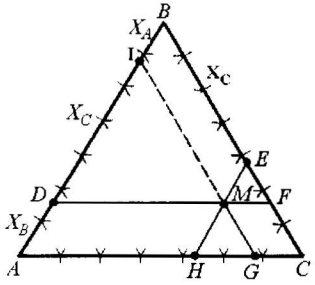
19.2 pav. Tipinės ekstrakcijos izotermos: *1* – ne elektrolitų, *2* – elektrolitų

Pusiausvyros linijos y–x diagramoje, esant pastoviai proceso temperatūrai, vadinamos *ekstrakcijos izotermomis* (19.2 pav.).

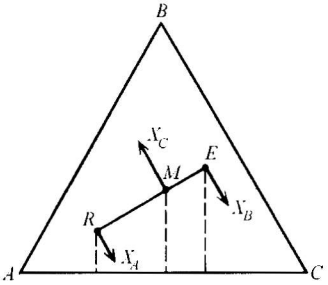
Jeigu žinomos izotermos skirtingoms temperatūroms, tai galima parinkti optimalią ekstrakcijos temperatūrą.

Trikampės diagramos. Dažnai fazės, dalyvaujančios ekstrakcijoje iš skysčių, iš dalies viena kitoje tirpsta. Tokiais atvejais ekstrakte, be ekstrahento ir ištirpusios medžiagos (ekstraktyvo), yra dar ir tam tikras kiekis tirpiklio iš pradinio tirpalo. Rafinate, be pradinio tirpalo tirpiklio ir ekstraktyvo likučio,

bus dar ir tam tikras kiekis ekstrahento. Abu tirpalai sudaryti iš trijų komponentų. Šių fazių sudėtis patogu vaizduoti trikampėje koordinačių sistemoje (19.3 pav.).



19.3 pav. Koncentracijų žymėjimas trikampėje diagramoje



19.4 pav. Sverto taisyklės taikymas trikampėje diagramoje

Viršūnės *A, B* ir *C* atitinka grynus komponentus, o kraštinės *AB*, *BC* ir *AC* – dviejų komponentų tirpalų sudėtis. Kiekvienoje kraštinėje atidėta skalė moliniais arba masės procentais (nuo 0 iki 100). Trikampio plokštumoje esantys taškai atitinka trijų komponentų tirpalų sudėtis. Konkretaus komponento koncentracija tirpale nusakoma lygiagrečiai su kiekviena trikampio kraštine nubrėžtos atkarpos iki susikirtimo su kitomis kraštinėmis ilgiu. Pvz., 19.3 pav. taške *M* tirpalo koncentracijos atitinka taškus *D, E* ir *H* , o jų kiekiai atitinkamai lygūs atkarpoms: *CG* – komponento *A*, *GH* – komponento *B* ir *AH* – komponento *C*. Atkarpų suma *ME* + *MD* + *MH* lygi trikampio kraštinei, pvz., *AB*, kadangi *MD* = *ID*, *ME* = *IB* ir *MH* = *AD*, t. y. jų suma sudaro 100 %. Taigi bet kuris taškas trikampio viduje išreiškia trikomponentės sistemos sudėtį, o taškai jo kraštinėse – dviejų komponentų sistemų sudėtį.

Naudojant trikampes diagramas ir sverto taisyklę, galima nustatyti atskirų fazių sudėtį ir jų kiekį (19.4 pav.). Sumaišius du trijų komponentų mišinius (pvz., atitinkančius taškus *E* ir *R*) gaunamas mišinys, kurio vidutinė sudėtis yra tiesės atkarpoje, jungiančioje šiuos taškus (pvz., taške *M*). Pagal sverto taisyklę šis taškas *M* atkarpą *ER* dalija į mažesnes atkarpas, atvirkščiai proporcingas pradinių mišinių kiekiams.

Jei mišinio kiekį pažymėsime *M*, rafinato kiekį *R*, o ekstrakto – *E*, kg, tai

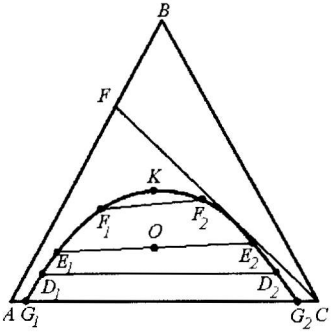
$$R + E = M .$$

Pagal sverto taisyklę

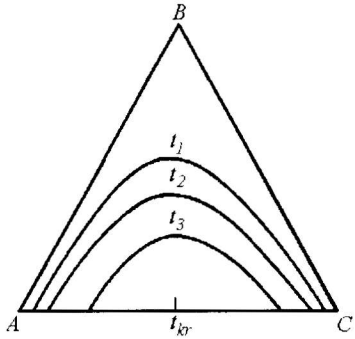
$$E/R = \overline{RM}/\overline{EM} . \qquad (19.2)$$

Iš (19.2) lygties galima nustatyti taško M padėtį trikampėje diagramoje, kai žinomi R ir E kiekiai.

19.5 paveiksle viršūnė A atitinka pradinio tirpalo gryną tirpiklį, viršūnė B – ištirpusią medžiagą (ekstraktyvą), viršūnė C – ekstrahentą. Komponentai A ir B, B ir C vienas kitame tirpsta neribotai, o komponentai A ir C – ribotai. Kai sistemoje yra tam tikras kiekis komponentų A ir C, gali susidaryti dviejų fazių skysta sistema.



19.5 pav. Pusiausvyros kreivė trikampėje diagramoje



19.6 pav. Temperatūros įtaka binodalinių kreivių padėčiai

Jeigu į tirpalus A ir C, kurių sudėtį atitinka taškai G_1 ir G_2, pridėsime trečiojo komponento B, tai išsisluoksniuojančių dviejų komponentų tirpalų sudėtis atitiks taškai D_1 ir D_2. Styga, jungianti taškus D_1 ir D_2, atitinka pusiausviros būsenos tirpalus. Pridėjus daugiau komponento B, gaunama išsisluoksniuojanti sistema, apibūdinama taškais E_1 ir E_2 ir t. t. Šie taškai pamažu artėja vienas prie kito, kadangi į sistemą pridėjus komponento B komponentų A ir C tarpusavio tirpumas gerėja. Dar daugiau pridėjus komponento B, komponentų A ir C tarpusavio tirpumas tiek pagerėja, kad susidaro vienos fazės tirpalas, kurio sudėtis atitinka tašką K. Šis taškas vadinamas kritiniu. Sujungus taškus D_1, E_1 ir t. t., gaunama pusiausvyros, arba binodalinė, kreivė, virš kurios yra taškai, atitinkantys vienos fazės sistemą, ir, tiriant ekstrakcijos procesą, ši sritis nenagrinėjama.

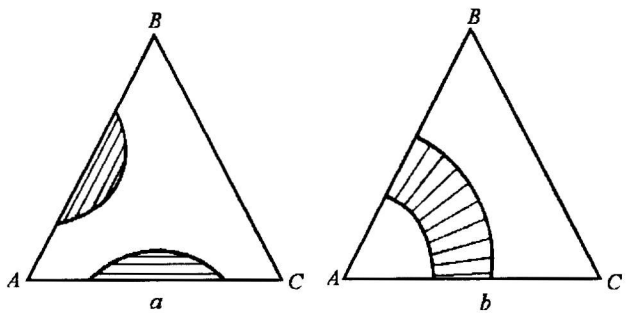
Stygos, jungiančios binodalinės kreivės taškus D_1 ir D_2, E_1 ir E_2 ir t. t., vadinamos konodomis, kurios nėra lygiagrečios viena su kita, kadangi komponentas B netolygiai pasiskirsto tarp komponentų A ir C. Bet kuris taškas, pvz., taškas O (19.5 pav.), esantis pusiausvyros kreivės apribotoje srityje, atitinka dvifazę sistemą, kurios sudėtys E_1 ir E_2 išreiškiamos per tašką O nubrėžtos stygos galais. Kraštinės AC atkarpose AG_1 ir G_2C esantys taškai atitinka vienalyčius (homogeninius) dviejų komponentų A ir C tirpalus. Atkarpoje

G_1G_2 esantys taškai atitinka A ir C komponentų mišinius, susisluoksniuojančius į du homogeninius dviejų komponentų sočiuosius tirpalus.

Naudojant trikampes diagramas ir pusiausvyros kreivę (19.5 pav.), galima nustatyti ribinę komponento B koncentraciją pradiniame tirpale, kurios neviršijant šį komponentą galima ekstrahuoti. Iš taško C brėžiama pusiausvyros kreivės liestinė. Ji su trikampio kraštine AB, kurios taškai atitinka pradinio mišinio sudėtis, susikirs taške F. Šis taškas parodo ribinę pradinio (ekstrahuojamo) tirpalo koncentraciją, esant nurodytai temperatūrai. Šiuo atveju ekstrahento C sąnaudos būna didžiausios. Padidinus atkarpos AF ilgį, liestinė CF eis per diagramos sritį, atitinkančią vienfazę sistemą, kurioje ekstrakcija nevyksta.

Kadangi tirpumas priklauso nuo temperatūros, tai, kintant temperatūrai, keisis ir binodalinės kreivės padėtis. Paprastai, didėjant temperatūrai, tarpusavio tirpumas didėja, todėl heterogeninius mišinius atitinkanti trikampės diagramos dalis mažėja ir pakankamai aukštoje temperatūroje ši sritis gali visai išnykti. Temperatūra, kurioje komponentai tarpusavyje visiškai ištirpsta ir susidaro homogeninis tirpalas, vadinama kritine (19.6 pav.).

Be 19.5 pav. ir 19.6 pav. parodytų tipinių trikampių diagramų, galimos ir kitų tipų diagramos, pavyzdžiui, su dviem riboto tirpumo zonomis (19.7 pav., *a*), kurios gali susilieti į vieną riboto tirpumo zoną (19.7 pav., *b*), ir kt.



19.7 pav. Trikampių diagramų tipai:
a – su dviem riboto tirpumo zonomis, *b* – su viena riboto tirpumo zona

Technologinį skysčių ekstrakcijos procesą sudaro šie trys pagrindiniai etapai: 1) pradinis tirpalas L_1 sumaišomas su ekstrahentu V_1; 2) perskiriamos dvi nesimaišančių skysčių fazės ir gaunami ekstraktas V_2 ir rafinatas L_2; 3) ekstrahentas regeneruojamas, t. y. jis pašalinamas iš ekstrakto ir rafinato.

Ekstrahentas regeneruojamas dažniausiai taip: rektifikuojamas, distiliuojamas su vandens garais, garinamas, rečiau – kristalizuojamas ir chemiškai valomas.

Skysčių perskyrimo ir koncentravimo procesuose rektifikacija dažnai įvairiai derinama su ekstrakcija.

19.3. Ekstrahento parinkimas

Ekstrahentas pasižymi gebėjimu iš dviejų arba trijų komponentų tirpalo išgauti vieną. Todėl pirmumas teikiamas tam ekstrahentui, kuris ištirpina daugiausia ekstraktyvo, o kitus tirpina tik minimaliai. Ekstrahentų selektyviosios savybės yra sąlygojamos sąveikos su pradinio tirpalo komponentais skirtumo, kuris priklauso nuo jų cheminės kilmės.

Pagrindinius pramonėje naudojamus ekstrahentus galima suskirstyti į tris grupes: 1) organinės rūgštys arba jų druskos (fenoliai, naftenų rūgštys, sulfonrūgštys ir kt.), kurios iš vandens fazės išgauna metalų katijonus bei organinę fazę; 2) organinių bazių druskos (pirminių, antrinių ir tretinių aminų druskos ir į jas panašios), kuriomis iš vandens tirpalų išgaunami metalų anijonai; 3) neutralūs tirpikliai (vanduo, spiritai, aldehidai, ketonai).

Ekstrahavimo atrankumas apibūdinamas vadinamuoju atrankos, arba selektyvumo, koeficientu β_B, kurio vertė nustatoma ekstrahento atrankumu paskirstomam komponentui B:

$$\beta_B = (y_B/x_B)/(y_A/x_A). \qquad (19.3)$$

Atrankos koeficientas yra santykinio komponento lakumo rektifikuojant analogas. Remiantis (19.1) lygtimi, (19.3) lygtis užrašoma taip:

$$\beta_B = m_B/m_A. \qquad (19.3a)$$

Iš šios lygties matyti, kad, didėjant perskyrimo koeficiento m_B vertei, atrankumas, arba selektyvumas, didėja. Kadangi $\beta_B = f(m_B)$, tai dydžio β_B vertė priklauso nuo tų pačių parametrų, kaip ir m_B, t. y. kinta keičiantis komponento B koncentracijai ekstrakte ir temperatūrai.

Kadangi, kai $\beta_B = 1$, proceso atrankumas lygus nuliui, t. y. ekstrakcijos būdu mišinio negalima perskirti. Parenkant ekstrahentą, turi būti $\beta_B > 1$. Realiomis sąlygomis β vertė turi būti ne mažesnė kaip 2. Jeigu kuris nors ekstrahentas turi mažą perskyrimo koeficientą (ir mažą β vertę), bet dėl kitų priežasčių jį naudoti tikslinga, tai m vertę galima padidinti, keičiant tirpalo pH (disocijuotai ekstrahuojamai medžiagai). Tinkamai parinkus pH, didėjant m_B ir mažėjant m_A (19.3a), gali gerokai padidėti β vertė. m_B vertę taip pat galima padidinti į sistemą pridedant neekstrahuojamos druskos, t. y. naudojant išsūdymo metodą.

Ekstragentui keliami ir kiti reikalavimai: jis turi būti lengvai regeneruojamas, jo klampa turi būti maža, paviršiaus įtempis didelis, tankis turi labai

skirtis nuo pradinio tirpalo tankio, turi būti netoksiškas, nelakus, nesprogus, nedegus, nebrangus, stabilus ekstrakcijos, reekstrakcijos ir laikymo metu.

19.4. Ekstrakcijos proceso medžiagų balansas

Jeigu ekstrakcijos procese dalyvaujančios fazės tarpusavyje beveik netirpios, tai proceso medžiagų balansas užrašomas bendra lygtimi (1.7). Vykstant vienkartei fazių sąveikai (periodinė ekstrakcija), proceso medžiagų balansas pagal bendrus medžiagų srautus užrašomas (16.7) lygtimi

$$V_p + L_p = V_g + L_g$$

arba šioje dalyje naudojamais simboliais:

$$F + S = E + R\,; \qquad (19.4)$$

čia F – pradinio tirpalo, S – ekstrahento, R – rafinato, E – ekstrakto kiekiai, kg.

(19.4) lygtis gali būti taikoma ir tada, kai nuolatinis procesas tenkina sąlygą, kad visi į ją įeinantys dydžiai matuojami debito vienetais, pvz., kg/s. Nagrinėjamu atveju ekstrakcijos proceso darbo linijos lygtis identiška visų masės mainų procesų (16.9) lygčiai:

$$y_g = y_p + (L/V)\cdot(x_p - x_g).$$

Todėl tiriant ir skaičiuojant ekstrakcijos procesą, kai fazės tarpusavyje netirpios, galima panaudoti žinomą grafinį pusiausvyros ir darbo linijų sudarymo y–x diagramoje metodą, kurį naudojant nustatoma proceso varos jėga ir apskaičiuojamas ekstraktoriaus aukštis.

Tačiau ekstrahuojant iš skysčių, fazės dažnai tarpusavyje šiek tiek tirpsta. Todėl srautų kiekiai (debitai) ekstraktoriaus aukštyje keičiasi, santykis L/V (16.9) lygtyje nebus pastovus. Tada y–x diagramoje darbo linija bus kreivė. Kadangi šiuo atveju sistemą sudarys mažiausiai trys komponentai, tai tokių sistemų analizei tikslinga naudoti trikampes diagramas, sudarant pusiausvyros bei darbo koncentracijų priklausomybes.

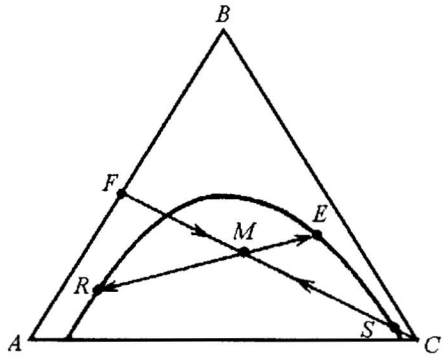
Tam (19.4) lygtis perrašoma taip:

$$F + S = M = R + E\,. \qquad (19.4a)$$

Naudojantis šia lygtimi, medžiagų balansą galima atvaizduoti trikampėje diagramoje (19.8 pav.).

Ekstrakcijos procesą sudaro F ir S sumaišymas ($F + S = M$), o po to šio trijų komponentų mišinio M perskyrimas į srautus R ir E. Pagal sverto taisyklę

$$F/S = \overline{SM}/\overline{(FM)}. \qquad (19.5)$$



19.8 pav. Ekstrakcijos medžiagų balanso vaizdavimas trikampėje diagramoje

Kai yra žinomas pradinio mišinio kiekis F, galima apskaičiuoti procesui būtiną ekstrahento kiekį S. Gautų ekstrakto E ir rafinato R srautų santykis nustatomas iš (19.2) lygties.

Komponentų A ir B medžiagų balansas ekstrakto ir rafinato srautuose (19.3 pav.) užrašomas taip:

$$R \cdot x_{AR} + E \cdot x_{AE} = M \cdot x_{AM}; \qquad (19.6)$$

$$R \cdot x_{BR} + E \cdot x_{BE} = M \cdot x_{BM}. \qquad (19.7)$$

Kadangi komponentų A, B ir C koncentracijų suma lygi 100 %, tai medžiagų balansas pagal ekstrahentą (t. y. pagal komponentą C) nereikalingas.

Panaudojus (19.4) lygtį, (19.6) ir (19.7) lygtys pertvarkomos taip:

$$E \cdot (x_{AE} - x_{AM}) = R \cdot (x_{AM} - x_{AR}); \qquad (19.8)$$

$$E \cdot (x_{BE} - x_{BM}) = R \cdot (x_{BM} - x_{BR}). \qquad (19.9)$$

Padalijus (19.8) lygtį iš (19.9) lygties, gaunama lygtis

$$(x_{AE} - x_{AM})/(x_{BE} - x_{BM}) = (x_{AM} - x_{AR})/(x_{BM} - x_{BR}), \qquad (19.10)$$

kuri yra tiesės lygtis.

Iš (19.2), (19.4)...(19.9) lygčių galima apskaičiuoti bet kurio srauto kiekį ir sudėtį, jeigu žinomi kitų trijų srautų kiekiai ir sudėtys.

19.5. Ekstrakcijos iš skysčių kinetika

Ekstrakcijos iš skysčių greitis bus nagrinėjamas, naudojant 16 dalyje aprašytą metodiką. Remiantis bendra masės perdavimo lygtimi (16.36), nuostoviojo proceso metu iš vienos fazės į kitą pereinantis medžiagos kiekis M proporcingas fazių sąlyčio paviršiaus plotui F ir vidutinei varos jėgai, išreikštai ekstrakto Δy_{vid} arba rafinato Δx_{vid} koncentracija:

$$M = K_y \cdot F \cdot \Delta y_{vid}; \qquad M = K_x \cdot F \cdot \Delta x_{vid}.$$

Šiose lygtyse masės perdavimo koeficientai K_y ir K_x apskaičiuojami taip:

$$K_y = \frac{1}{(1/\beta_D) + |m/\beta_T|}; \tag{19.11}$$

$$K_x = \frac{1}{(1/\beta_T) + |1/(m \cdot \beta_D)|}; \tag{19.12}$$

čia β_D ir β_T – disperguotos fazės ir dispersijos terpės masės atidavimo koeficientai.

Kadangi fazių sąlyčio paviršius ekstrakcijos metu yra vienos iš fazių dispergavimo metu susidariusių lašelių paviršius, tai masė perduodama per sferinį paviršių. Hidraulinės sąlygos lašelių viduje ir terpėje yra skirtingos. Todėl kiekvienos fazės masės pernešimas negali būti aprašytas identiškomis lygtimis.

Kadangi smulkinant disperguotą fazę lašelių forma ir dydis gali būti skirtingi, tai molekulinio ir konvekcinio pernešimo santykis juose gali iš esmės keistis. Kai lašeliai maži ($Re < 1$), vyrauja molekulinė difuzija. Šiuo atveju ribojantis masės pernešimo pasipriešinimas bus difuzinis pasipriešinimas lašelio viduje, todėl galima tarti, kad $K_y \approx \beta_x$.

Mažo ir vidutinio dydžio lašelių (kai $Re < 200$) β_D nustatyti galima naudoti tokią lygtį:

$$Nu'_D = 0{,}65 \cdot (Pe'_D)^{0,5} \cdot (1 + \mu/\mu_T)^{-0,5}. \tag{19.13}$$

Kai $Re > 200$,

$$Nu'_D = 0{,}32 \cdot (Re)^{0,6} \cdot (Pr'_D)^{0,5} \cdot (1 + \mu/\mu_T)^{-0,5}; \tag{19.14}$$

čia $Nu'_D = \beta_D \cdot d/D_D$, $Pr'_D = \nu_D/D_D$, $Pe'_D = w_s \cdot d/D_D$ – atitinkamai difuziniai disperguotos fazės Nuselto, Prandtlio, Peklė kriterijai; d – lašelio skersmuo; ν_D – disperguotos fazės kinematinė klampa; w_s – santykinis fazės greitis; μ_D ir μ_T – dispersinės fazės ir dispersijos terpės dinaminė klampa; D_D – molekulinės difuzijos dispersijos fazėje koeficientas.

Skaičiuojant masės atidavimo koeficientą dispersijos terpėje, kai lašelyje nėra cirkuliacijos (t. y. kai lašeliai maži), rekomenduojama naudotis lygtimi

$$Nu'_T = 2 + 0{,}76 \cdot Re^{0,5} \cdot \left(Pr'_T\right)^{0,33}; \qquad (19.15)$$

čia $Nu'_T = \beta_T \cdot d/D_T$, $Pr'_T = \nu_T/D_T$ – dispersijos terpės difuziniai Nuselto ir Prandtlio kriterijai; ν_T – dispersijos terpės kinematinė klampa; D_T – perskiriamosios medžiagos molekulinės difuzijos dispersijos terpėje koeficientas.

Jeigu perskyrimo koeficientas $m >> 1$ (žr. (19.1) lygtį) ir lašelių skersmuo bei Re kriterijaus vertė gana dideli ($Re >> 200$), tai pagrindinis difuzinis pasipriešinimas procesui bus susikoncentravęs dispersijos terpėje. Šiuo atveju galima tarti, kad $K_x \approx \beta_T$.

Masės pernešimas ekstrahuojant iš skysčių iš esmės paspartėja atsinaujinus fazių sąlyčio paviršiui, smulkinant lašelius arba jiems koalescuojant. Praktiškai tai vyksta visų tipų ekstraktoriuose. Daug įtakos masės mainams turi ir fazes skiriančioje riboje vykstantys paviršiniai reiškiniai. Veikiant tarpfazinio paviršiaus įtempio σ gradientui, arti fazes skiriančios ribos esantys skysčio sluoksniai ima judėti paviršiaus įtempio didėjimo kryptimi, todėl tarp fazių atsiranda srautų turbulizacija, kuri paspartina masės pernešimą.

Reikia pasakyti, kad ekstrakcijos metu masės pernešimo greičiui įtakos turi net ir nedidelis paviršinio aktyvumo medžiagų kiekis fazių sąlyčio paviršiuje. Priemaišos geba nuslopinti lašelių deformaciją ir skysčio cirkuliaciją juose. Taigi dėl paviršinio aktyvumo medžiagų adsorbcijos lašelių paviršiuje fazes skiriančioje riboje atsiranda papildomas pasipriešinimas masės pernešimui. Į šias aplinkybės neatsižvelgta sudarant (19.13)...(19.15) lygtis. Todėl dažnai proceso greitis ekstraktoriuose skaičiuojamas pagal empirines lygtis, kurios nurodomos žinynuose.

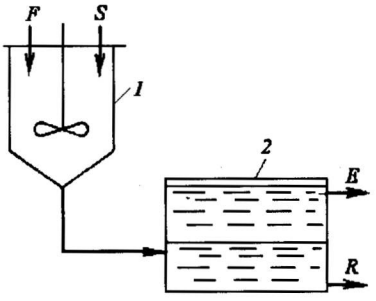
19.6. Pagrindiniai ekstrakcijos būdai

Priklausomai nuo to, kokiu laipsniu ištirpusios medžiagos (ekstraktyvas) išgaunamas iš pradinio tirpalo, taip pat nuo ekstraktui bei rafinatui keliamų reikalavimų ir kitų sąlygų galimi įvairūs ekstrakcijos iš skysčių variantai. Tačiau visada yra dvi pagrindinės ekstrakcijos stadijos: 1) ekstrahento ir pradinio mišinio sumaišymas jų tarpusavio sąlyčiui pagerinti; 2) dviejų nesimaišančių gauto mišinio fazių – ekstrakto ir rafinato perskyrimas. Kaip buvo minėta, po ekstrakcijos ekstrahentas dažnai yra regeneruojamas specialiame regeneracijos aparate, t. y. pašalinamas iš ekstrakto ir rafinato.

Cheminėje technologijoje dažniausiai naudojami tokie ekstrakcijos būdai: vienkartinė ekstrakcija, daugkartinė ekstrakcija esant kryžminiam arba priešsroviniam ekstrahento judėjimui, nepertraukiama priešsrovinė ekstrakci-

ja. Pramonėje plačiausiai paplito ekstrakcija vienu ekstrahentu, nors neretai ekstrahuojama ir dviem ekstrahentais.

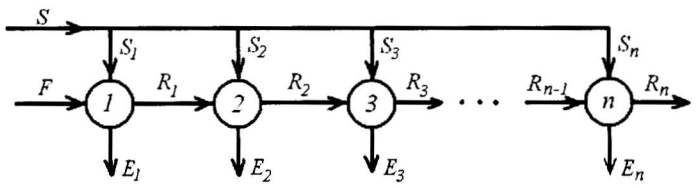
Vienkartinė ekstrakcija. Ekstrahuojant šiuo būdu, pradinis tirpalas *F* ir ekstrahentas *S* sumaišomi maišytuve *1* (19.9 pav.), po to nusodintuve *2* perskiriami į du sluoksnius: ekstrakto *E* ir rafinato *R*.



19.9 pav. Vienkartinės ekstrakcijos schema: *1* – maišytuvas, *2* – nusodintuvas-separatorius

Dėl intensyvaus maišymo ir pakankamos mišinio buvimo maišytuve *1* trukmės nusistovi fazių pusiausvyra, t. y. vienkartine ekstrakcija galima pasiekti efektyvumą, atitinkantį teorinėje koncentracijos kitimo pakopoje pasiekiamą efektyvumą. Ekstraktyvo išgavimo laipsnis gali būti padidintas, didinant į maišyklę *1* tiekiamą ekstrahento kiekį, tačiau tai mažina ekstrakto koncentraciją ir brangina procesą. Procesas gali būti tiek periodinis, tiek nuolatinis. Periodinio proceso atveju ekstrakto ir rafinato perskyrimo stadija gali vykti maišyklėje *1*. Tuomet nereikalingas nusodintuvas *2*.

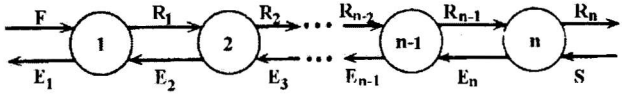
Daugkartinė ekstrakcija esant kryžminiam ekstrahento srautui. Ekstrahuojant šiuo būdu (19.10 pav.), pradinis tirpalas ir atitinkami rafinatai kiekvienoje ekstrakcijos pakopoje, susidedančioje iš maišyklės ir nusodintuvo (19.10 pav. jis nepavaizduotas), apdorojama šviežio ekstrahento porcija S_1, S_2 ir t. t. Rafinatas tiekiamas nuosekliai į tolesnę pakopą, o ekstraktai E_1, E_2 ir t. t. po kiekvienos pakopos išteka iš sistemos. Taip ekstrahuojant, pradinis tirpalas *F* įteka į pirmąją pakopą, o galutinis rafinatas R_n gaunamas paskutinėje – *n*-ojoje pakopoje.



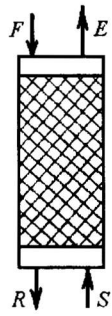
19.10 pav. Daugkartinės ekstrakcijos, esant kryžminiam ekstrahento srauti, schema: *1, 2, 3,..., n* – pakopos

Šiuo metodu iš pradinio tirpalo galima išgauti visą ekstraktyvą ir gryną rafinatą. Tačiau neišvengiama pradinio tirpiklio nuostolių, nes iš kiekvienos pakopos jo dalis pasišalina su ekstraktu.

Daugkartinė ekstrakcija esant priešsroviniam ekstrahento srautui. Tokiai ekstrakcijai būdingas daugkartinis kontaktavimas pakopose 1, 2 ir t. t. su priešsroviniu būdu judančio rafinato R ir ekstrakto E srautu (19.11 pav.).



19.11 pav. Daugkartinės ekstrakcijos, ekstrahentui judant prieš srovę, schema: *1, 2, 3,..., n–1, n* – pakopos



19.12 pav. Nuolatinės priešsrovinės ekstrakcijos schema

Pradinis tirpalas F ir ekstrahentas S tiekiami priešinguose schemos galuose. Kadangi daugkartine ekstrakcija, ekstrahentui judant prieš srovę, galima gauti nurodytos kokybės produktą ir aparatas yra gana našus, šis ekstrakcijos būdas pramonėje plačiai naudojamas.

Nuolatinė priešsrovinė ekstrakcija. Taip ekstrahuojama kolonose (pvz., įkrautinėse). Didesnio tankio tirpalas (pvz., pradinis tirpalas) nepertraukiamai tiekiamas į viršutinę kolonos dalį (19.12 pav.), o iš ten teka žemyn. Į apatinę kolonos dalį tiekiama mažesnio tankio frakcija (nagrinėjamu atveju ekstrahentas), kuri kolona kyla į viršų. Šis ekstrakcijos būdas pramonėje naudojamas gana dažnai.

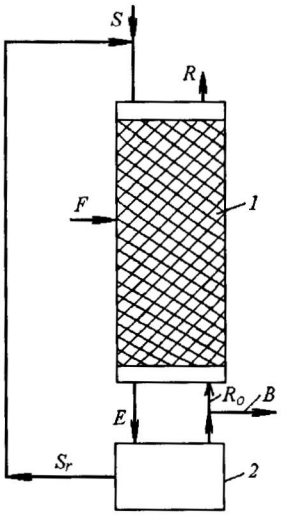
Priešsrovinė ekstrakcija su flegma. Kai pradinį tirpalą reikia perskirti didesniu laipsniu, galima ekstrahuoti su flegma, kaip ir rektifikacijos metu (19.13 pav.). Šiuo atveju pradinis mišinys tiekiamas į vidurinę aparato dalį (į maitinimo pakopą).

Po ekstrahento regeneracijos regeneratoriuje *2* dalis gauto produkto R_0 grąžinama kaip flegma į ekstraktorių *1*, o kita dalis atskiriama kaip komponentas B, išgautas iš pradinio tirpalo. Tirpalų R_0 ir B sudėtys yra vienodos. Taigi ekstraktoriaus elementas *2* ir rektifikacijos deflegmatorius yra analogai.

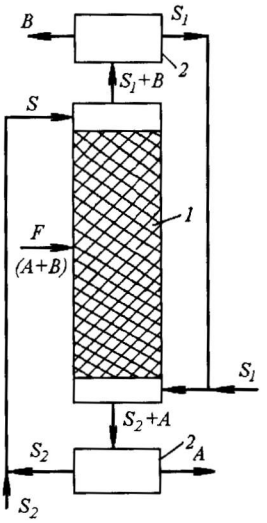
Flegmos srautas R_0, kontaktuodamas su ekstrakto srautu, išplauna iš jo iš dalies arba visiškai ištirpusį pradinį tirpiklį A. Pradinis tirpiklis patenka į rafinatą, todėl perskyrimo laipsnis ir rafinato išeiga padidėja.

Reikia pasakyti, kad ekstrakcija su flegma pagerina pradinio mišinio perskyrimą, tačiau padidina ekstrahento sąnaudas ir aparato tūrį, todėl procesas

brangsta. Taigi flegmos kiekio parinkimas turi būti pagrįstas techniniais ekonominiais skaičiavimais.



19.13 pav. Nuolatinės priešsrovinės ekstrakcijos su flegma schema: *1* – ekstraktorius, *2* – ekstrahento regeneracijos aparatas



19.14 pav. Ekstrakcijos su dviem ekstrahentais schema: *1* – ekstraktorius, *2* – ekstrahento regeneracijos aparatas

Ekstrakcija dviem ekstrahentais. Jeigu pradiniame mišinyje yra du arba daugiau komponentų, kuriuos reikia išgauti atskirai po vieną arba kelių komponentų grupėmis, tai ekstrahuojama dviem tarpusavyje nesimaišančiais ekstrahentais. Ekstrahentai parenkami taip, kad kiekvienas iš jų atskirtų tam tikrą komponentą arba komponentų grupę. Tokios ekstrakcijos schema pavaizduota 19.14 pav. Pradinis mišinys F, susidedantis iš komponentų A ir B, tiekiamas į vidurinę aparato *1* dalį . Didesnio tankio (negu ekstrahentas S_1) ekstrahentas S_2, pasirinktinai tirpinantis komponentą A, tiekiamas į aparato *1* viršutinę dalį, o ekstrahentas S_1, pasirinktinai tirpinantis komponentą B, – į aparato *1* apatinę dalį.

Dažnai ekstrahentas S_1 vadinamas ekstrahuojančiuoju. Todėl viršutinė aparato *1* dalis (virš pradinio mišinio F tiekimo vietos) vadinama ekstrakcijos sekcija. Šioje sekcijoje ekstraktas prisodrinamas komponento B. Ekstrahentas S_2 vadinamas praplaunančiuoju, o aparato apatinė dalis, kurioje rafinatas perskiriamas arba išgaunamas didesniu laipsniu, – išplovimo sekcija. Ekstrakcija dviem ekstrahentais dažniausiai naudojama panašaus tirpumo medžiagoms

perskirti. Šiuo atveju ekstrahentų sąnaudos yra palyginti didelės ir tai pabrangina procesą.

19.7. Ekstraktorių konstrukcija ir veikimo principas

Pagal fazių sąveikos principą arba fazių kontakto būdą ekstraktoriai skirstomi į dvi grupes: pakopinius ir diferencialinius-kontaktinius. Ekstraktoriai dar skirstomi į gravitacinius, kuriuose fazių greitis yra sąlygojamas fazių tankių skirtumo, ir mechaninius, kuriuose energijos srautas suteikiamas iš šalies mechaniškai maišant, veikiant išcentrinėms jėgoms ir kt. Praktiškai bet kuriame ekstraktoriuje viena iš fazių įvairiais būdais disperguojama ir pasiskirsto kitoje – dispersijos fazėje lašeliais. Po kiekvieno sumaišymo šios fazės aparatuose separuojamos, nes tai būtina ekstrahentui regeneruoti. Pramonėje dažniausiai naudojami nuolatinio veikimo ekstraktoriai.

Pakopiniai ekstraktoriai. Šios grupės ekstraktoriai yra sudaryti iš diskretinių pakopų, kurių kiekvienoje fazės susikeičia, yra perskiriamos ir juda prieš srovę į gretimą pakopą.

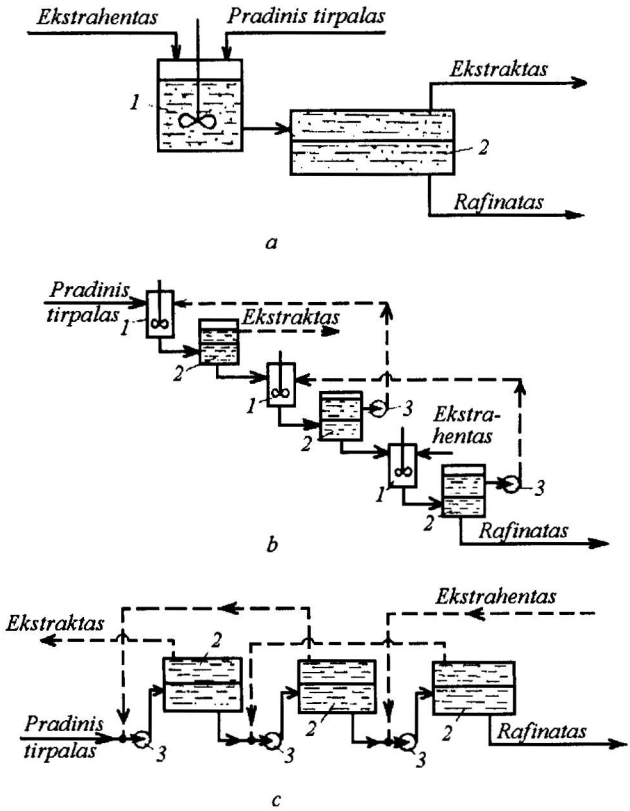
19.15 pav. pavaizduotos vienos pakopos (*a*) ir daugiapakopės (*b* ir *c*) ekstraktorių schemos. Labiausiai paplitę pakopiniai ekstraktoriai, kuriuos sudaro nuosekliai sujungti maišytuvai ir nusodintuvai.

Kiekviena tokio ekstraktoriaus pakopa susideda iš maišytuvo *1*, kuriame, intensyviai maišant fazes, vyksta ekstrakcija, ir nusodintuvo *2*, kuriame ekstraktas atskiriamas nuo rafinato. Maišytuve fazės visiškai susimaišo (t. y. šis aparatas dirba pagal idealaus sumaišymo modelį – *ISM*), todėl jame pasiekiama fazių pusiausvyra. Taigi vienoje pakopoje fazės juda pasroviui viena kitos atžvilgiu, o visame ekstraktoriuje sudaromas priešsrovinis fazių judėjimas.

Esant kaskadiniam pakopų sujungimui (19.15 pav., *b*), didesnio tankio fazė juda iš pakopos į pakopą savitaka, o mažesnio tankio fazė transportuojama siurbliais *3*. Horizontaliuosiuose ekstraktoriuose mažesnio ir didesnio tankio fazėms transportuoti iš pakopos į pakopą naudojami siurbliai (19.15 pav., *c*, mažesnio tankio fazei transportuoti naudojami siurbliai nepavaizduoti), ir tai pabrangina ekstraktoriaus gamybą ir eksploataciją. Tuo atveju, kai fazių pusiausvyra greitai nusistovi, jas gali sumaišyti siurbliai.

Tokių ekstraktorių pranašumas yra didelis efektyvumas. Be to, galima greitai pakeisti pakopų skaičių, jie gali dirbti smarkiai kintant fazių fizikinėms savybėms, jų tūriniams santykiams. Tačiau jie užima didelius gamybinius plotus, juose yra maišyklės su individualiais varikliais ir reduktoriais.

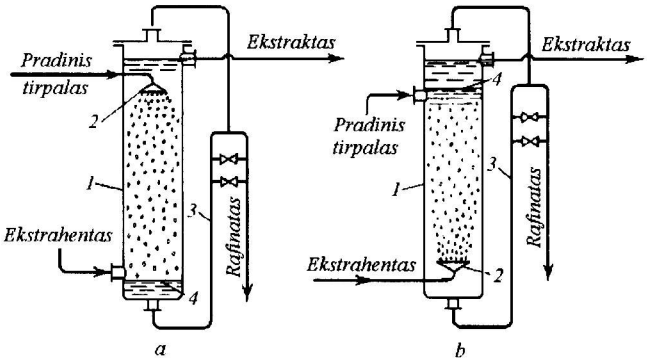
Didelio našumo ekstraktoriai su maišytuvais-nusodintuvais (iki 1500 m^3/h) naudojami hidrometalurgijoje, sodrinant uraną ir kt.



19.15 pav. Vienpakopių (*a*) ir daugiapakopių (*b* ir *c*) ekstraktorių schemos: *1* – maišytuvas, *2* – nusodintuvas, *3* – siurbliai

Diferencialiniai-kontaktiniai ekstraktoriai. Šios grupės ekstraktoriai nuo pakopinių skiriasi tuo, kad jų fazių kontakto paviršius pagal aparato aukštį būna nepertraukiamas ir koncentracija kinta nuosekliai. Tačiau, priešingai negu pakopiniuose, pusiausvyra jų skerspjūvyje nepasiekiama. Diferencialiniai-kontaktiniai ekstraktoriai kompaktiškesni už pakopinius, užima mažiau gamybinio ploto.

Prie diferencialinių-kontaktinių ekstraktorių priskiriami *gravitaciniai ekstraktoriai,* kuriuose fazės juda dėl jų tankių skirtumo. Pagal konstrukciją tai gali būti purkštuvinės, įkrautinės ir lėkštinės kolonos.



19.16 pav. Tuščiavidurės purkštuvinės kolonos-ekstraktoriai: *a* – išpurškiantys didesnio tankio fazę, *b* – išpurškiantys mažesnio tankio fazę; *1* – ekstraktoriai, *2* – purkštukai, *3* – hidraulinės užtvaros, *4* – fazių sąlyčio paviršius

Iš aprašomų ekstraktorių paprasčiausios konstrukcijos yra purkštuvinės kolonos (19.16 pav.). Juos sudaro tuščiavidurės kolonos *1* su dispergavimo elementu *2*, kuris disperguoja pradinį tirpalą. Kai pradinio tirpalo tankis didesnis negu ekstrahento, tai dispergavimo elementas yra aparato viršuje (19.16 pav., *a*), o kai priešingai, – aparato apačioje (19.16 pav., *b*). Dispersijos terpė juda priešinga kryptimi negu disperguota fazė. Disperguotos fazės lašams judant per dispersijos terpės sluoksnį, lašai koalescencijuoja ir išteka iš kolonos. Didesnio tankio fazė išteka per hidraulinę užtvarą *3*, kuri padeda reguliuoti fazių perskyrimo laipsnį. Fazių perskyrimui pagerinti viršutinė ir apatinė kolonos dalys kai kada daromos didesnio skersmens negu vidurinė (tai sumažina dispersijos terpės judėjimo greitį ir pagerina fazių separavimo sąlygas).

Purkštuvinėse kolonose vidinė erdvė tuščia, todėl fazės kolonoje gali laisvai cirkuliuoti vertikalia kryptimi, t. y. šiuose aparatuose susidaro fazių išilginio maišymosi sąlygos. Šis reiškinys dar labiau sustiprėja, kai padidinamas kolonos skersmens ir aukščio santykis. Išilginis, arba grįžtamasis, maišymasis dėl proceso varos jėgos sumažėjimo sumažina masės perdavimo greitį. Todėl purkštuviniai ekstraktoriai yra mažo efektyvumo, masės perdavimo vieneto aukštis juose siekia 5...6 m. Purkštuvinių ekstraktorių trūkumu laikomas ir „užspringimo" greičio sumažėjimas, didėjant disperguotos fazės daliai sistemoje, kadangi šiuo atveju sumažėja dispersijos terpės pratekamasis skerspjūvis ir daugiau pašalinama lašelių.

Purkštuviniuose ekstraktoriuose galima apdoroti ir užterštus skysčius. Kai kada juose ekstrahuojamos suspensijos.

Plačiai pramonėje naudojami ir įkrautiniai ekstraktoriai (19.17 pav.), kurių konstrukcija tokia pat kaip įkrautinių adsorberių. Įkrovai dažnai naudojami Rašigo žiedai arba kt. (žr. 17 dalį). Įkrova sudedama ant atraminių tinklų sekcijomis, tarp kurių fazės maišosi. Vieną iš fazių (19.17 pav. – ekstrahentą) paskirstymo elementas disperguoja dispersijos terpėje (pradiniame tirpale). Įkrovos sluoksnyje lašai daug kartų koalescencijuoja, o po to yra susmulkinami, ir tai padidina proceso efektyvumą. Labai svarbu parinkti įkrovos medžiagą. Ji turi būti geriau drėkinama dispersijos terpės negu disperguotos fazės, nes tai trukdo lašams koalescencijuoti ir disperguotos fazės plėvelei susidaryti įkrovos paviršiuje, o tai sumažina fazių sąlyčio paviršių. Pastebėta, kad keraminė ir fajansinė įkrova vandeniu drėkinama geriau negu organiniais tirpikliais, o plastikinė įkrova geriau drėkinama organiniais tirpikliais. Fazės sluoksniuojasi nusistovėjimo zonose *3*, kurių skersmuo fazių separavimui pagerinti dažnai daromas didesnis už ekstraktoriaus skersmenį.

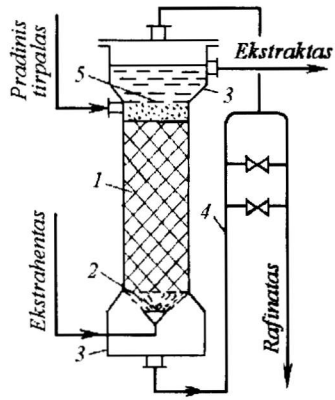
Kaip ekstraktorius galima naudoti bet kurios 17 dalyje nagrinėtos konstrukcijos lėkštines kolonas, tačiau pramonėje labiausiai paplito tinklinės kolonos (19.18 pav.). Tokiuose aparatuose viena iš fazių, tekėdama pro lėkščių *1* skylutes, daug kartų disperguoja ir koalescencijuoja. Dėl daugkartinio fazės dispergavimo ekstrakcijos proceso greitis padidėja, todėl šiai fazei įtekant pro lėkštės skylutes į dispersijos terpę atsiranda „galinių" efektų. Kadangi šis procesas susijęs su šuolišku koncentracijos kitimu, tai tinkliniai ekstraktoriai kai kada priskiriami pakopinių ekstraktorių grupei.

Tinkliniuose ekstraktoriuose dispersijos terpė (19.18 pav. – pradinis tirpalas) teka išilgai lėkštės *1* ir per perpylimo lataką teka nuo lėkštės ant lėkštės. Po sąveikos su dispersijos terpe lašeliai koalescencijuoja ir iš lašelių po aukščiau esančia lėkšte susidaro mažesnio tankio fazės sluoksnis. Jeigu disperguojama didesnio tankio fazė, tai jos sluoksnis susidaro ant aukščiau esančios lėkštės. Šie sluoksniai, vadinami slegiančiaisiais, koloną pagal aukštį suskirsto į sekcijas ir priverčia dispersijos fazę tekėti tik per perpylimo latakus. Be to, šie sluoksniai sudaro hidrostatinį slėgį, reikalingą skylučių lėkštėse hidrauliniam pasipriešinimui nugalėti, todėl skystis išteka pro skylutes ir yra iš naujo disperguojamas.

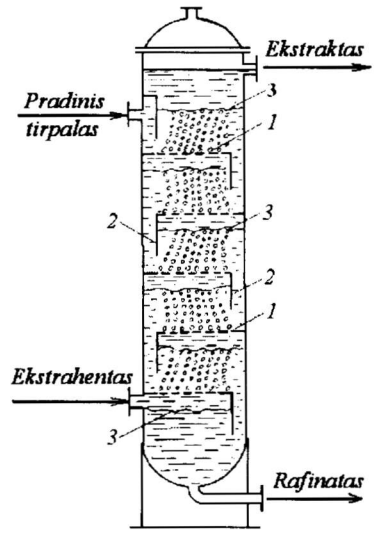
Pramonėje naudojami tinklinių lėkščių ekstraktoriai su apvaliomis skylutėmis, kurių skersmuo d_0 yra nuo 2 iki 10 mm (didesni – klampiems skysčiams), dažnai 3...4 mm skersmens skylutės sudaro nuo 50 iki 60 % lėkštės ploto. Tam, kad iš gretimų skylučių ištekantys lašeliai nesusilietų vienas su kitu, skylučių žingsnis t apskaičiuojamas taip: $t = (1{,}5...3) \cdot d_0$.

Gravitaciniai tinklinių lėkščių ekstraktoriai yra paprastos konstrukcijos, gana našūs, neturi judamųjų dalių, nes lėkštėmis yra suskirstyti į sekcijas, juose išilginis maišymasis mažas.

Tinklinių lėkščių ekstraktoriai naudojami sintetinio kaučiuko gamyboje, naftos chemijoje, farmacijoje ir kitose pramonės šakose.



19.17 pav. Įkrautinis ekstraktorius: *1* – įkrova, *2* – paskirstiklis, *3* – nusodintuvas, *4* – hidraulinė užtvara, *5* – išsisluoksniuojančias fazes skirianti riba



19.18 pav. Tinklinių lėkščių ekstraktorius: *1* – lėkštės, *2* – didesnio tankio fazės nutekėjimo nuo lėkštės ant lėkštės elementas, *3* – išsisluoksniuojančias fazes skirianti riba

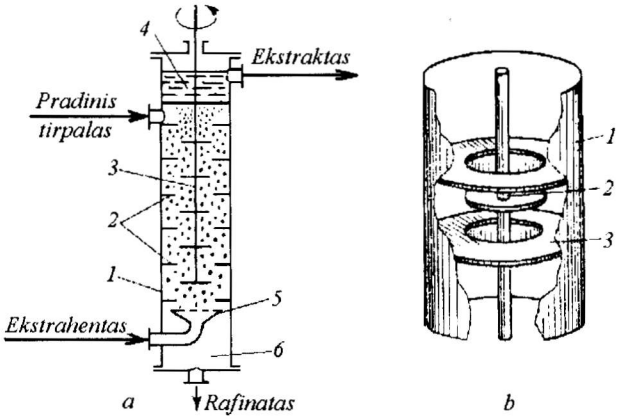
Mechaniniams ekstraktoriams priskiriami diferenciniai-kontaktiniai ekstraktoriai, kuriuose susiliečiančioms fazėms tiekiama išorinė energija.

Pramonėje naudojamas mechaninis rotorinis-diskinis ekstraktorius pavaizduotas 19.19 pav. Jame lygiais atstumais viena nuo kitos pritvirtintos nejudamos žiedinės pertvaros *2* (statorius), dalijančios kolonę į keletą nedidelio tūrio sekcijų. Kolonos *1* ašyje įrengtas vertikalusis velenas, ant kurio įtvirtinti horizontalūs lygaus paviršiaus diskai (rotorius). Rotoriaus diskų skersmuo šiek tiek mažesnis už statoriaus diskų skylučių skersmenį.

Sukantis velenui su diskais, dėl trinties ir išcentrinių jėgų pradinis tirpalas juda link ekstraktoriaus sienelių. Pasiekusi sieneles ši fazė juda jų paviršiumi žemyn ir atsimuša į statoriaus žiedus. Kartu su aprašytu judėjimu vyksta ir ašinis judėjimas. Purkštuku *5* disperguotas mažesnio tankio ekstrahentas juda priešpriešiais pradiniam tirpalui.

Kiekvienoje sekcijoje susidaro horizontalus uždaras dispersijos terpės srautas, sukeliantis intensyvų fazių maišymąsi, kurio metu disperguota fazė daug kartų smulkinama diskais ir kai susiduria su sienelėmis dėl turbulentinių pulsacijų. Smulkinami lašeliai, susidurdami tarpusavyje, koalescencijuoja ir taip intensyvina masės perdavimo procesą. Po sumaišymo, aptekėdamos žie-

dines pertvaras, ribojančias kolonos sekcijas, fazės dėl tankių skirtumo iš dalies atsiskiria. Nusistovėjimo zonose *4* ir *6* iš srautų atitinkamai atsiskiria ekstraktas ir rafinatas, kurie po to pasišalina iš aparato.



19.19 pav. Rotorinis–diskinis ekstraktorius (*a*) ir vienas jo sekcijos variantas (*b*): *1* – kolona, *2* – žiedinės pertvaros, *3* – rotoriaus velenas su plokščiaisiais diskais *4*, *6* – atitinkamai mažo ir didesnio tankio fazių nusistovėjimo zonos, *5* – mažesnio tankio fazės purkštukas

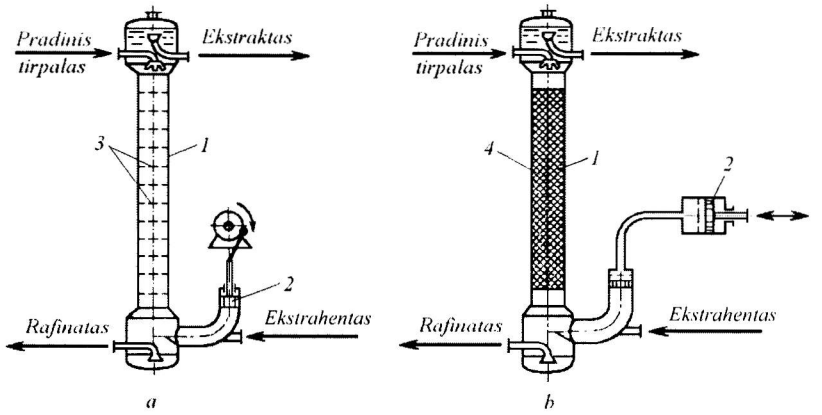
Rotoriniai ekstraktoriai tarpusavyje skiriasi maišymo elementų konstrukcija. Vietoj lygių diskų naudojami įvairių tipų maišikliai.

Pagrindiniu rotorinių ekstraktorių pranašumu laikomas didelis masės pernešimo efektyvumas, o didžiausias jų trūkumas yra gerokas masės perdavimo vieneto aukščio padidėjimas, didėjant aparato skersmeniui.

Masės pernešimo proceso efektyvumas ekstrakcijos metu gali būti padidintas sukeliant fazių pulsaciją. Pulsaciniuose ekstraktoriuose pulsacija skysčiui suteikiama dviem būdais: hidrauliškai generuojama išoriniu mechanizmu (pulsatoriumi) arba sukeliama tiesiogiai vibruojant perforuotas lėkštes, įtvirtintas ant bendro stovo, kuris slankioja aukštyn ir žemyn. Pulsacija ekstrakcijoje padeda geriau disperguoti skysčius, intensyvina fazių sąlyčio paviršiaus atsinaujinimą, pailgina disperguojamo skysčio buvimo ekstraktoriuje trukmę. Dažniausiai naudojami tinklinių lėkščių ir įkrautiniai pulsaciniai ekstraktoriai (19.20 pav.).

Kaip pulsatoriai *2* naudojami stūmokliniai (dažniausiai neturintys vožtuvų membraniniai) ir pneumatiniai siurbliai. Tinklinių lėkščių pulsaciniuose ekstraktoriuose (19.20 pav., *a*) naudojamos lėkštės *3* be perpylimo latakų, nors yra sukurtos ir specialios tinklinių lėkščių konstrukcijos pulsacinei ekstrakcijai atlikti. Pulsacinėse įkrautinėse kolonose (19.20 pav., *b*) gali būti nau-

dojami stūmokliniai pulsatoriai su oro pagalve, leidžiantys pulsatoriaus stūmokliui išvengti kontakto su ekstraktoriuje esančiu skysčiu, todėl galima ekstrahuoti ir agresyvius skysčius.



19.20 pav. Pulsaciniai ekstraktoriai: tinklinių lėkščių (*a*) ir įkrautiniai (*b*): *1* – kolona, *2* – stūmokliniai pulsatoriai, *3* – lėkštės, *4* – įkrova

Pulsaciniai ekstraktoriai yra efektyvūs, aptarnaujančiajam personalui nereikia liestis su naudojamais skysčiais, kas labai svarbu, jeigu ekstrahuojami radioaktyvūs arba toksiški skysčiai.

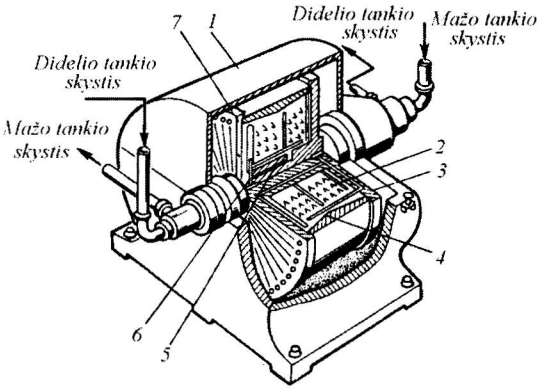
Pulsacinių kolonų trūkumai tokie: didelis dinaminis apkrovimas į pamatus, brangi eksploatacija, sunku apdoroti lengvai emulsijas sudarančias sistemas. Pulsacinių kolonų skersmuo ne didesnis kaip 1 m, nes, padidėjus skersmeniui, sunkiau tolygiai paskirstyti greičius ekstraktoriaus skerspjūvyje ir gerokai padidėja energijos sąnaudos.

Skirtingai nuo pulsacinių, vibraciniuose ekstraktoriuose efektyvus paskirstymas pasiekiamas aukštyn ir žemyn judant paketui tinklinių lėkščių, per kurias skystis prateka čiurkšlėmis, suyrančiomis į lašus dispersijos terpėje.

Vibraciniai ekstraktoriai naudoja mažiau energijos negu to paties našumo pulsaciniai ekstraktoriai, nes vibracija perduodama ne visam skysčio tūriui, o tik jo daliai, esančiai arti lėkščių ar jų paketui, kurio masė ne didesnė kaip 10 % ekstraktoriuje esančio skysčio masės. Lėkščių vibracijos amplitudė maža, o dažnis didelis.

Jeigu fazių tankių skirtumas mažas, tai reliatyviam fazių judėjimo greičiui ir proceso efektyvumui padidinti sėkmingai naudojami išcentriniai ekstraktoriai.

Išcentriniai ekstraktoriai sėkmingai naudojami išgaunant peniciliną ir kitus antibiotikus, tiksliosios organinės sintezės procesuose, valant augalinius riebalus ir pan. Vieno iš pramonėje paplitusių išcentrinių ekstraktorių schema pavaizduota 19.21 pav.

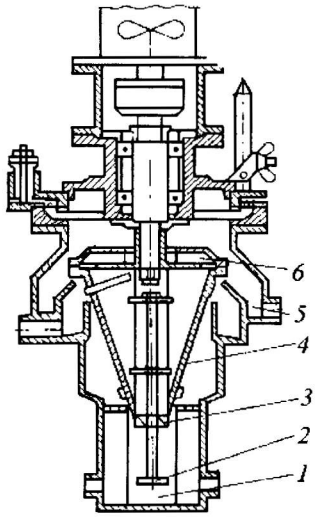


19.21 pav. Išcentrinis ekstraktorius: *1* – korpusas, *2* – *V* formos žiedas, *3* – rotorius, *4* – mažo tankio skysčio (ekstrahento) tiekimo atvamzdis, *5* – mažo tankio skysčio (ekstrakto) šalinimo atvamzdis, 6 – didelio tankio skysčio (pradinio tirpalo) tiekimo atvamzdis, *7* – didelio tankio skysčio (rafinato) šalinimo atvamzdis

Rotoriaus *3* viduje per visą jo plotį išdėstoma perforuota į spiralę suvyniota juosta *3* arba įstatomi koncentriniai perforuoti cilindrai su skylutėmis arba plyšeliais abiem fazėms ištekėti. Didesnio ir mažesnio tankio fazės slėgiu tiekiamos pro priešingus dideliu greičiu (nuo 600 iki 1200 (4500) aps./min) besisukančio tuščiavidurio veleno *1* galus. Šiuo atveju mažesnio tankio fazė tiekiama rotoriaus periferijoje, o didesnio tankio fazė – arčiau rotoriaus centro. Rotoriui sukantis ir veikiant išcentrinei jėgai, juostos arba cilindrų angose fazės daug kartų intensyviai sąveikauja, o paskui atsiskiria spiralės kanaluose arba erdvėje tarp cilindrų.

Ekstrakcijos mišiniuose esančios kietosios priemaišos kaupiasi besisukančiame rotoriuje. Rotoriaus separacinį tūrį užpildžius nuosėdoms daugiau pašalinama abiejų fazių ir pablogėja ekstrakcijos proceso technologiniai rodikliai: masės perdavimo efektyvumas, išgavimo laipsnis, tikslinio produkto išvalymo laipsnis.

Dabar ekstrakcijai vis plačiau naudojami pakopiniai išcentriniai ekstraktoriai. Šiuose ekstraktoriuose suderinus intensyvaus tirpalų maišymo ir po jo einančio emulsijos perskyrimo procesus, galima pasiekti didelį masės perdavimo efektyvumą ir savitąjį našumą.



19.22 pav. Išcentrinis ekstraktorius, nepertraukiamai šalinantis nuosėdas: *1* – kamera, *2* – maišyklė, *3* – sraigtas, *4* – rotorius, *5* – žiediniai rinktuvai, *6* – hidraulinė užtvara

Sukurtas išcentrinis ekstraktorius (19.22 pav.), nepertraukiamai šalinantis kietąją fazę, kuri į ekstraktorių gali patekti su pradiniais tirpalais arba atsirasti jiems liečiantis. Šis ekstraktorius veikia taip. Pradiniai tirpalai patenka į kamerą *1* ir yra sumaišomi maišykle *2*. Gauta emulsija sraigtu *3* tiekiama į kūginės formos rotorių *4*, kuriame, veikiama išcentrinės jėgos, persiskiria. Perskirti skysčiai patenka į nejudamo korpuso *5* žiedinius rinktuvus, o iš jų savitaka išteka iš aparato. Rotoriaus kūginė forma ir speciali hidraulinės užtvaros *6* konstrukcija įgalina nepertraukiamai šalinti nuosėdas iš rotoriaus kartu su tankesne faze, todėl ekstraktorius gali veikti, nepažeisdamas hidrodinaminio režimo, esant iki 5 gramų kietosios fazės viename litre tirpalo. Maksimali nuosėdų masė, susikaupianti rotoriuje dinaminės pusiausvyros sąlygomis,sudaro ne daugiau kaip 10 % rotoriaus tūrio ir priklauso nuo rotoriaus kampinio greičio, skysčio srauto greičio rotoriuje, kietosios fazės koncentracijos tirpale, kampo tarp kūgio sudaromosios ir jo ašies, kūginio paviršiaus apdorojimo švarumo. Tokio proceso metu fazių nuostoliai ne didesni kaip 0,1 %, o jo masės perdavimo proceso efektyvumas, kai fazių kontakto trukmė yra kelios sekundės, sudaro apie 100 %, t. y. ekstraktorius atitinka idealaus sumaišymo modelį. Aparato konstrukcija leidžia, keičiant maišymo kameros tūrį, keisti fazių kontakto trukmę.

Aprašyto tipo išcentriniai ekstraktoriai dažnai jungiami į kaskadas, kaip pavaizduota 19.15 paveiksle. Išcentriniai ekstraktoriai labai kompaktiški, efektyvūs, gali būti naudojami apdorojant sistemas, galinčias sudaryti stabilias emulsijas; skysčiai šiuose ekstraktoriuose būna neilgai (iki kelių sekundžių), taip pat maža jų sulaikomoji geba. Išcentrinių ekstraktorių trūkumas yra jų sudėtinga konstrukcija ir tai, kad fazės į aparatą turi būti tiekiamos slėgiu.

19.8. Ekstraktorių skaičiavimas

Kadangi skysčiai ekstrahuojami skirtingais metodais ir ekstraktorių konstrukcijos yra iš principo skirtingos, tai pakopinių ir diferencinių-kontaktinių ekstraktorių skaičiavimas nagrinėjamas atskirai.

19.8.1. Pakopinių ekstraktorių skaičiavimas

Vienkartinė ekstrakcija (19.15 pav., *b*). Šiuose periodiškai dirbančiuose ekstraktoriuose maišymo ir fazių perskyrimo procesai vyksta tame pačiame aparate. Į aparatą supilamas pradinis tirpalas F, kurio koncentracija x_p, ir prie jo pridedamas reikalingas tirpiklio ekstrahento kiekis S. Po intensyvaus maišymo fazės nusistovi ir persiskiria į ekstraktą E ir rafinatą R. Tokios ekstrakcijos skaičiavimo tikslas – nustatyti reikalingą ekstrahento kiekį, gautą ekstrakto ir rafinato kiekį bei koncentracijas y_g ir x_g.

Pradžioje panagrinėsime atvejį, kada abi skystosios fazės tarpusavyje beveik netirpios. Šis procesas gali būti atvaizduotas fazių y–x diagramoje (19.23 pav.). Tokio proceso ekstraktyvo medžiagų balansas

$$F \cdot x_p + S \cdot y_p = E \cdot y_g + R \cdot x_g . \qquad (19.16)$$

Esant palyginti nedidelėms ekstraktyvo koncentracijoms, $E \approx S = V$, o $R \approx F = L$. Tada (19.16) lygtis užrašoma taip:

$$L \cdot x_p + V \cdot y_p = V \cdot y_g + L \cdot x_g . \qquad (19.17)$$

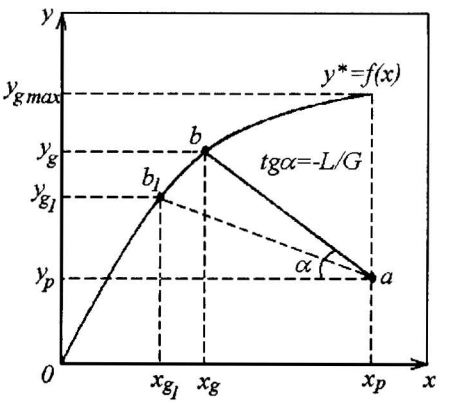
Iš čia gauname:

$$(y_g - y_p)/(x_g - x_p) = -L/V . \qquad (19.18)$$

(19.18) lygtis yra tiesės, kurios pasvirimo kampo α tangentas lygus L/V, lygtis. Skaičiuojant vienkartinę periodinę ekstrakciją, dažniausiai būna žinomas pradinio tirpalo kiekis F, jo koncentracija x_p, ekstrahento pradinė koncentracija y_p. Ekstrahento sąnaudos šiam ekstrakcijos procesui apskaičiuojamos pagal lygtį

$$V = L \cdot (x_p - x_g)/(y_g - y_p). \qquad (19.18a)$$

Jos priklauso nuo po proceso susidariusių koncentracijų y_g ir x_g, kurios, pasiekus pusiausvyrą, yra tarpusavyje priklausomos (19.23 pav., taškas *b*). Todėl V ir x_g (arba y_g) vertės parenkamos, analizuojant šių dydžių tarpusavio priklausomybę ir proceso kainą. Pažymėtina, kad ribinis ekstrakto prisisotinimas pasiekiamas, kai jo koncentracija tampa lygi $y_{g\,max}$. Kuo didesnės ekstrahento sąnaudos S, tuo mažesnė $tg\alpha$ vertė ir ekstraktyvo kiekis ekstrakte y_g bei rafinate x_g (19.23 pav., taškas b_1).



19.23 pav. Vienkartinės ekstrakcijos proceso vaizdavimas *y–x* diagramoje

Jeigu turime vertinti sistemos komponentų tarpusavio tirpumą, tai ekstrakcijos procesas analizuojamas ir skaičiuojamas naudojant trikampę diagramą (19.24 pav.), kuri yra sudaryta pagal analogiją su 19.8 paveikslu. Šiuo atveju santykis tarp pradinio tirpalo ir ekstrahento kiekio užrašomas (19.5) lygtimi:

$$F/S = \overline{CM}/\left(\overline{FM}\right);$$

iš čia $S = F \cdot \overline{FM}/\left(\overline{CM}\right)$, o rafinato ir ekstrakto tarpusavio priklausomybė

$$R/E = \overline{EM}/\left(\overline{RM}\right). \qquad (19.19)$$

(19.19) lygtį galima pertvarkyti taip:

$$R/\left(E+R\right) = \overline{EM}/\left(\overline{RM}+\overline{EM}\right), \qquad (19.20)$$

arba

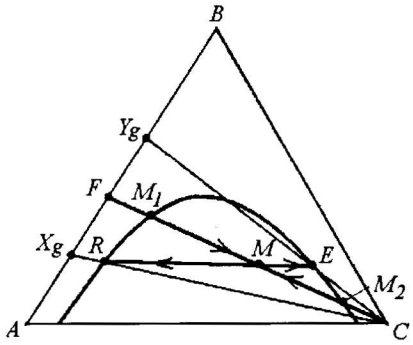
$$R/M = \overline{EM}/\left(\overline{RE}\right). \qquad (19.20a)$$

Iš čia galima apskaičiuoti rafinato kiekį

$$R = M \cdot \overline{EM}/\left(\overline{RE}\right), \qquad (19.20b)$$

o ekstrakto kiekis

$$E = M - R = M - M \cdot \overline{EM}/\left(\overline{RE}\right) = \\ = M \cdot \left(\overline{RE} - \overline{EM}/\overline{RE}\right) = M \cdot \overline{RM}/\left(\overline{RE}\right). \qquad (19.21)$$



19.24 pav. Vienkartinės ekstrakcijos proceso vaizdavimas trikampėje diagramoje

Pagal (19.18)...(19.21) lygtis apskaičiuojamos ekstrahento sąnaudos ir ekstrakto bei rafinato kiekiai. Rafinato ir ekstrakto sudėtis galima nustatyti iš taško C per taškus R ir E nubrėžus spindulius iki susikirtimo su trikampio kraštine AB. Gauti taškai x_g ir y_g parodo galutines ekstraktyvo koncentracijas rafinate ir ekstrakte.

Minimalus ir maksimalus ekstrahento kiekis tiriamajam procesui gali būti nustatytas taip. Kadangi taškas M priklauso nuo linijų RE *ir* CF padėties, tai, kai atkarpa FM_1 yra minimali (taškas M_1 yra binodalinėje kreivėje), minimalios bus ir ekstrahento sąnaudos S_{min}:

$$S_{min} = F \cdot \overline{FM_1} / \left(\overline{CM_1}\right). \qquad (19.22)$$

Šiuo atveju ekstraktyvo koncentracija rafinate x_g bus maksimali. Perkeliant tašką M spinduliu CF į dešinę iki ribinės – pusiausvyros būsenos (taškas M_2 binodalinėje kreivėje), galima nustatyti tiriamajam procesui maksimalias ekstrahento sąnaudas:

$$S_{max} = F \cdot \overline{FM_2} / \left(\overline{CM_2}\right). \qquad (19.23)$$

Ekstrahento ir pradinio mišinio kiekių (debitų) santykis S/F pagal analogiją su savitosiomis adsorbento sąnaudomis vadinamas savitosiomis ekstrahento sąnaudomis. Perrašę atitinkamai (19.22) ir (19.23) lygtis, gauname lygtis minimalioms ir maksimalioms savitosioms ekstrahento sąnaudoms apskaičiuoti:

$$\left(S/F\right)_{min} = \overline{FM_1} / \left(\overline{CM_1}\right); \qquad (19.22a)$$

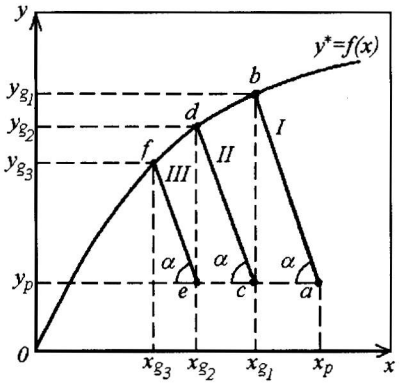
$$\left(S/F\right)_{max} = \overline{FM_2} / \left(\overline{CM_2}\right). \qquad (19.23a)$$

Naudojantis (19.22a) ir (19.23a) lygtimis, galima atlikti tiriamojo ekstrakcijos proceso analizę ir skaičiavimus.

Šias lygtis galima naudoti ir nuolatinei vienkartinei ekstrakcijai; tokiu atveju *F, S, E* ir *R* matuojama kilogramais per sekundę.

Daugkartinė ekstrakcija ekstrahentui judant kryžmai. Šis ekstrakcijos būdas nuo anksčiau išnagrinėto skiriasi tuo, kad lygiagrečiai į kiekvieną pakopą (19.10 pav.) tiekiama S_1, S_2 ir t. t., kg/s, šviežio ekstrahento. Kaip ir vienkartinės ekstrakcijos atveju, atliksime proceso analizę *y–x* diagramoje.

Laikantis sąlygos, kad kiekvienoje pakopoje pasiekiama pusiausvyros būsena, nubrėžiama pirmosios pakopos darbo linija *ab* (19.25 pav.). Iš taško *a* kampu α brėžiama linija iki susikirtimo su pusiausvyros linija $y^* = f(x)$. Gautas rafinatas, kurio sudėtis yra tokia pat, kaip ir į antrąją pakopą tiekiamo tirpalo sudėtis, ir lygi x_{g1}. Laikant, kad visose pakopose santykis *L/V* yra pastovus, visų pakopų darbo linijų pasvirimo kampas yra vienodas ir lygus α. Kadangi šviežio ekstrahento koncentracija pastovi, tai surandamas taškas *c* ir iš jo nubrėžiama linija iki susikirtimo su pusiausvyros linija (taškas *d*), po to analogiškai brėžiama pakopos *fe* darbo linija ir t. t., iki pasiekiama reikiama koncentracija x_g. Nustačius pakopų skaičių, pagal analogiją su vienkartinės ekstrakcijos skaičiavimu atliekami kitų ekstrakcijos proceso parametrų skaičiavimai.



19.25 pav. Daugkartinės ekstrakcijos proceso, esant kryžminiam ekstrahento srautui, vaizdavimas *y–x* diagramoje

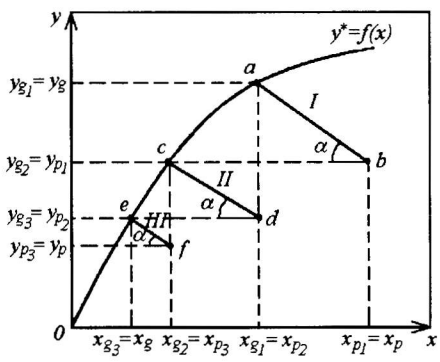
19.26 pav. Daugkartinės ekstrakcijos proceso, esant kryžminiam ekstrahento srautui, pakopų skaičiaus nustatymas, naudojant trikampę diagramą

Tuo atveju, kai procese dalyvaujantys komponentai iš dalies vienas kitą tirpina, daugkartinės ekstrakcijos procesas, esant kryžminiam ekstrahento srautui, gali būti atvaizduotas trikampėje diagramoje (19.26 pav.). Linija *CF* vaizduoja pradinio mišinio ir ekstrahento sumaišymo procesą. Po to trigubasis mišinys, kurio sudėtis M_1, susisluoksniuoja ir yra perskiriamas į *I* pakopos

ekstraktą E_1 ir rafinatą R_1. Toliau rafinatas R_1 ekstrahuojamas šviežia ekstrahento S porcija. 19.26 pav. tai atvaizduota linija CR_1. Susidaręs naujas trigubasis mišinys, kurio sudėtis M_2, susisluoksniuoja ir yra perskiriamas į *II* pakopos ekstraktą E_2 bei rafinatą R_2 ir t. t., iki bus gautas reikiamos sudėties rafinatas.

Daugkartinė ekstrakcija ekstrahentui judant prieš srovę. Pradžioje nagrinėjamas procesas, kai pradinio mišinio tirpiklis ir ekstrahentas tarpusavyje netirpūs. Šiuo atveju atskiroje pakopoje švarių ekstrahentų srautai nesikeičia, t. y. judėdami pagal 19.11 pav. pavaizduotą schemą šių ekstrahentų srautai lieka pastovūs. Tada kiekvienos pakopos (pvz., *i*-osios) ekstraktyvo medžiagų balansas bus užrašomas lygtimi, analogiška (19.18) lygčiai:

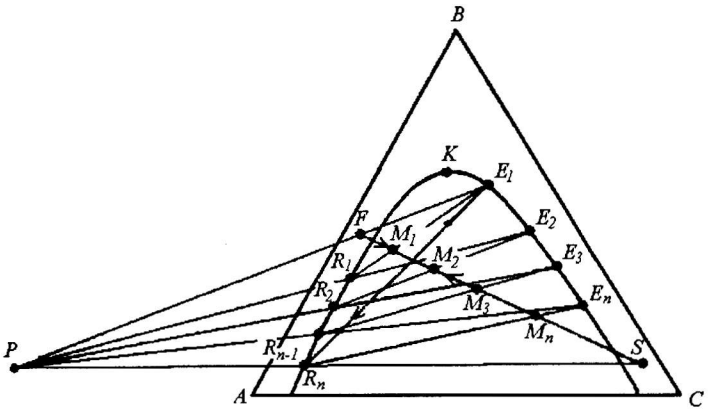
$$\left(y_{g_i} - y_{p(i+1)}\right) / \left(x_{g_i} - x_{p(i-1)}\right) = -L/V \,. \qquad (19.24)$$



19.27 pav. Daugkartinės ekstrakcijos proceso, ekstrahentui judant prieš srovę, pakopų skaičiaus nustatymas y–x diagramoje

Procesas y–x diagramoje (19.27 pav.) vaizduojamas taip: nubrėžiama pusiausvyros linija $y^* = f(x)$, po to brėžiama kiekvienos pakopos darbo linija. Iš horizontalės (su ordinate y_g) susikirtimo su pusiausvyros linija taško a kampu α $(tg\alpha = -L/V)$ iki susikirtimo su vertikale x_{p_1} brėžiama *I* pakopos darbo linija *ab*. Iš taško *c* lygiagrečiai su linija *ab* brėžiama linija iki susikirtimo su vertikale $x_{g_1} = x_{p_2}$ ir t. t., iki pasiekiama reikiama ekstrakto ir rafinato sudėtis. Taip nustatomas procesui reikalingas pakopų skaičius.

Jeigu turime nustatyti pradinio tirpalo tirpiklio ir ekstrahento tarpusavio tirpumą, tai proceso analizei ir skaičiavimams atlikti naudojama trikampė diagrama (19.28 pav.).



19.28 pav. Daugkartinės ekstrakcijos proceso, ekstrahentui judant prieš srovę, teorinių pakopų skaičiaus nustatymas trikampėje diagramoje

Viso aparato (19.11 pav.) medžiagų balansas

$$M = F + S = R_n + E_1 . \qquad (19.25)$$

Srautų skirtumą I pakopoje pažymime $F - E_1 = P$. Tada (19.25) lygtis užrašoma taip:

$$F - E_1 = R_n - S = P . \qquad (19.26)$$

Visų pakopų medžiagų balansai panašūs. Tuomet pirmosios pakopos

$$F + E_2 = E_1 + R_1 \quad \text{ir} \quad F - E_1 = R_1 - E_2 = P \quad \text{ir t. t.}$$

Taigi taškai F, P ir E_1 pagal sverto taisyklę turi būti išdėstyti vienoje tiesėje. Vienoje tiesėje taip pat turi būti išdėstyti ir taškai R_1, P, E_2 ir t. t. Jeigu bet kurių dviejų mišinių kiekių skirtumas yra pastovus dydis P, tai šiuos mišinius apibūdinančius trikampės diagramos taškus jungiančios tiesės susikerta viename taške P, kuris vadinamas poliumi.

Teorinių pakopų skaičiui nustatyti taškai E_1 ir F, S ir R_n sujungiami tiesėmis, kurios susikerta taške P. Sujungdami tiesėmis pusiausvyros kreivėje esančius taškus E_1 ir R_1, E_2 ir R_2, ..., E_n ir R_n, gauname konodas E_1R_1, E_2R_2, ..., E_nR_n, kurių kiekviena apibūdina teorinę pakopą. Matyti, kad stygų (konodų) E_1R_1, E_2R_2 ir t. t. skaičius lygus tiriamajam ekstrakcijos procesui atlikti reikalingų teorinių pakopų skaičiui. Primename, kad, pakopoje pasiekus pusiausvyrą, realių pakopų skaičius atitinka teorinių pakopų skaičių.

Eksperimentais nustatyta, kad pasirinktos sudėties rafinato kiekis priklauso nuo savitųjų ekstrahento sąnaudų S/F. Rafinato išeiga didėja mažėjant savito-

sioms ekstrahento sąnaudoms, bet šiuo atveju padidėja teorinių pakopų skaičius. Realus ekstrahento kiekis parenkamas tarp minimalių ir maksimalių jo sąnaudų, atsižvelgiant į proceso techninių-ekonominių skaičiavimų duomenis.

19.8.2. Diferencialinių-kontaktinių ekstraktorių skaičiavimas

Šie ekstraktoriai skaičiuojami panašiai kaip absorberiai ir rektifikacijos kolonos (žr. 17 ir 18 dalis). Šių skaičiavimų tikslas – nustatyti kolonų skersmenį ir aukštį.

Vienas iš sistemos *skystis-skystis* savitumų yra mažas fazių tankių skirtumas. Todėl gravitaciniuose aparatuose, kuriuose reliatyvusis (santykinis) fazių judėjimo greitis priklauso nuo jų tankių skirtumo ir būna palyginti nedidelis – keli cm/s arba net mm/s.

Jeigu didesnio tankio skysčio lašai yra disperguota fazė ir ji juda kitame mažesnio tankio nejudančiame skystyje – dispersijos terpėje, tai lašų judėjimo (t. y. nusodinimo) greitis w_0, nepaisant jų tarpusavio sąveikos įtakos nusodinimui, gali būti apskaičiuotas pagal (6.59) lygtį:

$$w_0 = \left[4 \cdot g \cdot d \cdot (\rho_s - \rho_l)/(3 \cdot \zeta \cdot \rho_l)\right]^{0,5}.$$

Primename, kad ši lygtis išvesta tiriant, kaip skystis apteka kietos medžiagos rutulio formos daleles, todėl sistemoms *skystis-skystis* ją galima taikyti tik tuomet, kai lašai yra nedeformuoti rutuliukai, kurių viduje skystis necirkuliuoja.

Kai $Re < 1$ ($Re = w_0 \cdot \rho_t \cdot d/\mu_t$, kur ρ_t ir μ_t – dispersijos terpės tankis ir klampa), mažų lašelių laisvo nusodinimo greitis gali būti apskaičiuojamas pagal Rybčinskio ir Adamaro lygtį:

$$w_0 = \Delta\rho \cdot g \cdot d^2 \cdot (\mu_d - \mu_t)/\left[6 \cdot \mu_t \cdot (2 \cdot \mu_t + 3 \cdot \mu_d)\right]. \qquad (19.29)$$

Didesnių lašų nusodinimo greičiui apskaičiuoti naudojamos įvairios empirinės priklausomybės, kurios būna nurodytos žinynuose.

Suvaržyto nusodinimo greitis w_{0s} priklauso nuo laisvo lašų nusodinimo greičio w_0:

$$w_{0s} = w_0 \cdot (1 - \Phi); \qquad (19.30)$$

čia Φ – sulaikymo geba (dispersinės fazės tūrio dalis ekstraktoriaus darbo zonoje).

Vykstant priešsroviniam dispersinės fazės ir dispersijos terpės judėjimui (pvz., purkštuvinėse kolonose), lašų (dispersinės fazės) judėjimo greitis w_d ekstraktoriaus sienelės atžvilgiu lygus reliatyvaus lašelių nusodinimo (arba kilimo) greičio ir dispersijos terpės (arba vientisosios fazės) judėjimo greičio w tarpusavio skirtumui:

$$w_d = w_{0s} - w\,. \tag{19.31}$$

Esant gana dideliems vientisosios fazės (dispersijos terpės) judėjimo greičiams w, suvaržyto lašelių (disperguotosios fazės) nusodinimo greitis gali susilyginti su srauto greičiu ir tuomet lašelių reliatyvusis judėjimo greitis taps lygus nuliui. Tokiu atveju disperguotoji fazė kaupsis ekstraktoriuje ir dėl to sumažės vientisosios (arba disperguojančiosios) fazės pratekamasis skerspjūvis, o tada dar labiau padidės jos tekėjimo greitis ir disperguotoji fazė bus nešama iš ekstraktoriaus ir šis pradės „springti". Kokia turi būti sulaikymo geba Φ, kad kolona „užspringtų", apskaičiuojama pagal lygtį

$$\Phi = \left[\left(b^2 + 8\cdot b\right)^{0,5} - 3\cdot b\right] \Big/ \left[4\cdot(1-b)\right]; \tag{19.32}$$

čia $b = V_d / V_t$ – disperguotos fazės ir dispersijos terpės debitų santykis.

Į nusodinimo greičio w_0 apskaičiavimo lygtį įeina lašo skersmuo d. Jam skaičiuoti yra pasiūlyta nemaža lygčių, tačiau pagal jas apskaičiuojama tik labai apytikslė d vertė.

Skysčiui čiurkšle ištekant iš angų arba antgalių, lašų dydis pasiskirsto palyginti plačiame intervale ir vidutinį lašų skersmenį apskaičiuoti yra gana sunku. Jei skystis nelabai klampus, lašo skersmenį d apytiksliai galima apskaičiuoti pagal tokią lygtį:

$$d = 1{,}92\cdot d_{\check{c}}\,; \tag{19.33}$$

čia $d_{\check{c}}$ – čiurkšlės, ištekančios iš d_0 skersmens angos, galo skersmuo. Technologiniams ir techniniams skaičiavimams galima imti $d_{\check{c}} \approx d_0$.

Kai ekstraktorių viduje yra įvairių kontaktinių elementų (įkrova, lėkštės ir pan.), vientisosios fazės srauto greitį darbo sąlygomis apskaičiuoti gana sunku. Galima tik pažymėti, kad vientisosios fazės srauto greitis w bus mažesnis nei purkštuvinėje kolonoje. Nustatyti lašų skersmenį įkrautiniuose ir lėkštiniuose ekstraktoriuose dar sunkiau, nes juose nuolat vyksta dispergavimo ir dispersinės fazės koalescencijos procesai.

Todėl koloniniuose ekstraktoriuose vientisosios fazės (arba dispersijos terpės) greitis apskaičiuojamas pagal empirines lygtis. Iš šių lygčių dažniausiai nustatomas ribinis greitis, t. y. „užspringimo" greitis, o po to, atsižvelgiant į konkrečias darbo sąlygas (pavyzdžiui, fazių savybes ir pan.), ekstraktorių konstrukciją ir kitus veiksnius, parenkamas vientisosios fazės (arba dispersijos terpės) greitis darbo sąlygomis w. Greičio w vertė panaudojama, apskaičiuojant kolonos-ekstraktoriaus skersmenį ir pagrindines jo masės mainų charakteristikas.

Ekstraktorių skersmuo. Ekstraktoriaus skersmuo apskaičiuojamas pagal (16.33) lygtį

$$D = [4 \cdot V_t / (\pi \cdot w)]^{0,5},$$

kurioje V_t – dispersijos terpės tūrio sekundinis debitas – būna duotas arba apskaičiuojamas, naudojant medžiagų balanso lygtį. Kaip jau buvo minėta, dispersijos terpės srauto greitis w įvairių konstrukcijų kolonose-ekstraktoriuose apskaičiuojamas pagal specialioje literatūroje pateiktas empirines lygtis.

Pavyzdžiui, įkrautinių kolonų „užspringimo" greitis w_u apskaičiuojamas pagal lygtis, analogiškas (17.21) ir (17.23) lygtims, su pataisos koeficientais, įvertinančiais skysčių ekstrahavimo savitumus:

$$y = 1{,}2 \cdot e^{-4 \cdot x}; \tag{19.34}$$

$$y = \left[w_u^2 \cdot a / \left(g \cdot S_{lsp}^3\right)\right] \cdot (\rho_l / \Delta\rho) \cdot \mu_l^{0,16} \cdot [\sigma_{T-D} / (\sigma_{T-V} - \sigma_{D-V})]; \tag{19.35}$$

$$x = (G_D / G_T)^{1/4} \cdot (\rho_l / \rho_s)^{1/8}; \tag{19.36}$$

čia a – įkrovos savitasis paviršius, m^2/m^3; S_{lsp} – įkrovos laisvasis skerspjūvio plotas, m^2/m^3; ρ_s, ρ_l, $\Delta\rho$ – fazių tankiai ir jų skirtumas, kg/m^3; μ_T – dispersijos terpės klampa, Pa·s; σ_{T-D}; σ_{T-V}; σ_{D-V} – paviršiaus įtempis fazių tarpusavio sąlytyje: dispersijos terpės ir disperguotosios fazės, dispersijos terpės ir vandens, disperguotosios fazės ir vandens, N/m; G_D/G_T – disperguotosios fazės ir dispersijos terpės masės debitų santykis.

Srauto greitį w darbo sąlygomis įkrautiniuose ekstraktoriuose prilyginame 60...80 % „užspringimo" greičio w_u. Taigi apskaičiuotą greitį w įrašius į (16.35) lygtį, apskaičiuojamas ekstraktoriaus skersmuo.

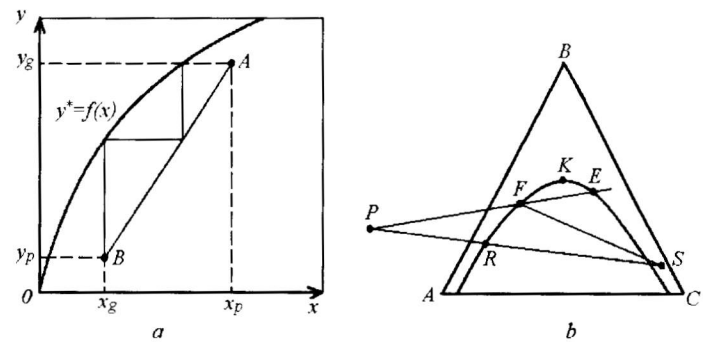
Ekstraktorių aukštis. Jeigu procese dalyvaujančios fazės yra tarpusavyje netirpios, tai nuolatinį ekstrakcijos procesą, esant priešpriešiniam srautų judėjimui, galima atvaizduoti y–x diagramoje, taip pat kaip absorbciją (žr. 17 dalį). Diagramoje (19.29 pav., *a*) atvaizduojama pusiausvyros kreivė $y^* = f(x)$, o po to darbo linija AB, kuri apibūdina koncentracijų kitimą darbo sąlygomis kolonos aukštyje. Po to nustatomas ekstraktoriaus aukštis, pavyzdžiui, teorinių pakopų skaičiaus nustatymo metodu.

Kai fazės iš dalies viena kitoje tirpsta, procesas atvaizduojamas trikampėje diagramoje (19.29 pav., *b*). Tokiam vaizdavimui pradinio tirpalo F, ekstrahento S, ekstrakto E ir rafinato R sudėtys turi būti duotos. Tiriamajam procesui atlikti reikalingam (būtinam) teorinių pakopų skaičiui nustatyti taškai E ir F, taip pat S ir R sujungiami tiesėmis, kurių tęsiniai turi susikirsti poliuje P. Toliau braižomos konodos – teorinės pakopos (taip pat, kaip buvo braižomos teorinės pakopos 19.28 pav.), paskui apskaičiuojamas ekstraktoriaus aukštis.

Dažniausiai kolonų ekstraktorių aukštis nustatomas *MPVA* ir *MPVS* metodu – pagal bendras (16.47)...(16.63) lygtis. Ekstrakcijai naudotinas bendras masės pernešimo vieneto aukštis pagal vientisąją fazę (pvz., laikant, kad vientisoji faze yra ekstrahentas) nustatomas taip:

$$h_{0y} = h_T + h_D / A ; \qquad (19.37)$$

čia h_T ir h_D – pernešimo vieneto aukštis vientisojoje ir disperguotojoje fazėse; $A = m \cdot V_D / V_T$ – ekstrakcijos faktorius.



19.29 pav. Nuolatinio ekstrakcijos proceso, esant fazių priešpriešiniam judėjimui, atvaizdavimas stačiakampėje (*a*) ir trikampėje (*b*) diagramose

Pernešimo vieneto aukštis pagal dispersinę fazę (nagrinėjamuoju atveju dispersinė fazė yra pradinis tirpalas) apskaičiuojamas taip:

$$h_{0x} = h_D + A \cdot h_T . \qquad (19.38)$$

Palyginus (19.37) ir (19.38) lygtis, gaunama nauja lygtis:

$$h_{0x} = A \cdot h_{0y} ;$$

h_T ir h_D vertes galima apskaičiuoti, naudojant masės atidavimo koeficientus β_T ir β_D:

$$h_T = V_T / (\beta_T \cdot a) \text{ ir } h_D = V_D / (\beta_D \cdot a);$$

čia $a = 6 \cdot \Phi \cdot \varepsilon / d_{vid}$ – savitasis fazių sąlyčio paviršius, m^2/m^3 (Φ – formos koeficientas); ε – ekstraktoriaus bendro tūrio dalis, prieinama skysčiui (purkštuvinėms kolonoms ε = *1*, įkrautinėms kolonoms – laisvajam įkrovos tūriui ir t. t.); d_{vid} – lašelių vidutinis skersmuo, m.

Dydžiai β_T, β_D ir d_{vid} apskaičiuojami pagal empirines lygtis, pvz., pagal (19.13)...(19.15) lygtis arba pagal kitas iš žinynų pasirinktas lygtis.

Pagal (19.37) ir (19.38) lygtis apskaičiavus h_{0y} arba h_{0x}, ekstraktoriaus darbo dalies aukštis apskaičiuojamas pagal (16.48) lygtį:

$$H = h_{0y} \cdot n_{0y} \quad \text{ir} \quad H = h_{0x} \cdot n_{0x}.$$

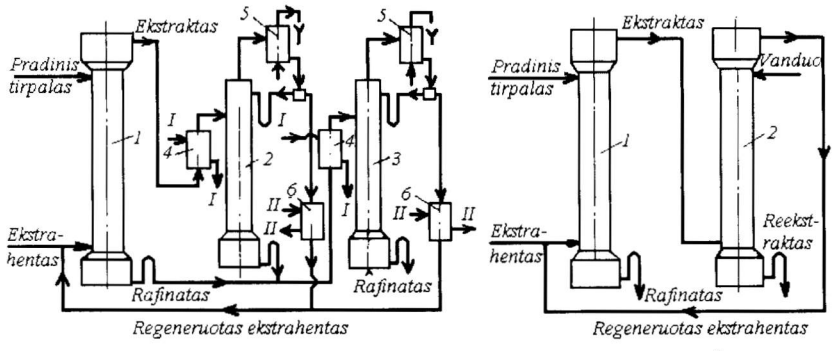
Po to skaičiuojamos ekstraktoriaus konstrukcijos.

19.9. Ekstrakcijos technologinės schemos

Nuolatinio veikimo ekstraktoriaus, kuriame ekstraktas regeneruojamas rektifikuojant, schema pateikta 19.30 pav., *a*.

Ekstrakcijos procesas vyksta kolonoje *1*, o gautų komponentų ir ekstrahento perskyrimas – kolonoje *2*. Ekstrahentas iš rafinato regeneruojamas rektifikacijos kolonoje *3*. Rektifikacijos kolonų *2* ir *3* darbui užtikrinti naudojami šilumokaičiai-šildytuvai *4*, deflegmatoriai *5* ir šaldytuvai *6*. Kolonose *2* ir *3* regeneruotas ekstrahentas grąžinamas į ekstraktorių *1*.

Metalų druskų ekstrakcijos (19.30 pav., *b*) įrenginio schema skiriasi tuo, kad po kolonos *1* metalų druskos iš ekstrakto išgaunamos reekstrakcija, o kolonoje *2* paverčiamos į vandenį (dažniausiai tirpinant).



19.30 pav. Principinės ekstrakcijos iš skysčių įrenginio schemos: *a* – kai ekstrahentas regeneruojamas rektifikuojant: *1* – ekstraktorius, *2*, *3* – rektifikacijos kolonos, *4* – šilumokaičiai-šildytuvai, *5* – deflegmatoriai, *6* – aušintuvai; *I* – šildalai, *II* – aušalai; *b* – kai ekstraktas išgaunamos reekstrahuojant: *1* – ekstraktorius, *2* – reekstrakcijos kolona

Kai kuriais atvejais ekstrakcijos įrenginiai būna sudėtingesni: juose įrengiami papildomi ekstrahento regeneracijos, didesnio laipsnio medžiagos išgavimo iš pradinio tirpalo elementai ir pan.

20 DALIS

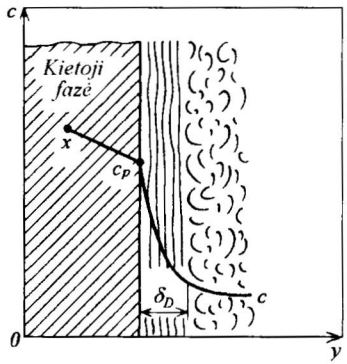
SKYSČIO, DUJŲ ARBA GARŲ IR KIETOJO KŪNO TARPUSAVIO MASĖS MAINAI

Masės mainų procesams, kuriuose dalyvauja skysčiai, dujos arba garai ir kietieji kūnai, priskiriama adsorbcija, jonų mainai, džiovinimas, tirpinimas, ekstrakcija iš kietųjų medžiagų ir kristalizacija. Šiems procesams būdinga nestacionari masės pernaša ir labai įvairus kietojoje fazėje vykstančių elementarių masės pernašos procesų mechanizmas.

Sistemose, kuriose dalyvauja kietoji fazė, pagrindinės masės pernašos stadijos yra pernaša išorinėje fazėje (skystyje, dujose arba garuose) ir vidinė pernaša (kietojoje fazėje).

20.1. Masės pernaša išorinėje fazėje

Masės pernaša išorinėje fazėje vyksta konvekcinės ir molekulinės difuzijos būdu. Pagrindiniai šios pernašos dėsningumai buvo nagrinėjami vadovėlio 16-oje dalyje. Šie procesai yra sąlygojami difuzinio pasienio sluoksnio, kurio storis δ_D, susidarymo arti kieto kūno paviršiaus (20.1 pav.).



20.1 pav. Koncentracijų kitimas kietojoje fazėje ir sraute prie jo paviršiaus

Šiame sluoksnyje vyrauja molekulinė pernaša. Už šio sluoksnio ribų masės pernašos procese vyrauja konvekcinė difuzija. Pasienio sluoksnyje koncentracijos kitimas pagal sluoksnio storį δ_D yra kreivės pavidalo. Tačiau laikant, kad koncentracija kinta tiesiškai, masės srauto tankį g galima išreikšti masės atidavimo lygtimi:

$$g = -D \cdot \partial c / \partial y = -D \cdot (c - c_p) / \delta_D = \beta_T \cdot (c_p - c); \qquad (20.1)$$

čia D ir β_T – molekulinės difuzijos ir masės atidavimo dispersijos terpėje koeficientas; c_p ir c – atitinkamai koncentracija kietojo kūno paviršiuje ir vientisosios fazės arba dispersijos terpės tūryje.

Masės atidavimo koeficientą β_T galima nustatyti įvairiais būdais, taip pat ir naudojant kriterijų lygtis:

$$Nu' = f(Re, Pr');$$

čia $Nu' = \beta_T \cdot d_{ekv} / D$ – difuzinis Nuselto kriterijus; $Re = w \cdot d_{ekv} \cdot \rho / \mu$ – Reinoldso kriterijus; $Pr' = \nu / D$ – išorinės fazės arba dispersijos terpės Prandtlio kriterijus; d_{ekv} – dalelės ekvivalentinis skersmuo.

Minimali Nuselto kriterijaus Nu' ir β_T vertė atitinka masės mainus tarp kietojo kūno ir nejudančio skysčio, dujų arba garų. Nagrinėjami tokie mainai, kai kietasis kūnas yra r spindulio rutulio formos dalelė, esanti jį gaubiančio skysčio viduryje. Masės srautas per tokio rutulio paviršių bus apskaičiuojamas pagal lygtį

$$M = -D \cdot (\partial c / \partial r) \cdot 4 \cdot \pi \cdot r^2. \qquad (20.2)$$

Šis srautas gali būti išreikštas ir naudojant masės atidavimo lygtį (20.1):

$$M = \beta_T \cdot 4 \cdot \pi \cdot r^2 \cdot (c_p - c).$$

Tada

$$D \cdot (\partial c / \partial r) = \beta_T \cdot (c_p - c). \qquad (20.3)$$

Panašiai pertvarkoma gauta diferencialinė lygtis (20.3):

$$-D \cdot (\partial c / \partial r) \approx D \cdot c / r, \quad \beta_T \cdot (c_p - c) \approx \beta \cdot c, \quad \beta_T \cdot r / D = 1.$$

Kai $r = R$ ir atsižvelgiant į tai, kad sferos skersmuo d_{sf} yra apibrėžiantysis dydis, o $d_{sf} = 2 \cdot R$, minimali Nuselto kriterijaus vertė $Nu' = \beta_T \cdot d_{sf} / D = 2$.

Kai srautas apteka atskiras (pavienes) daleles, Nu' priklausomybė nuo nusakančiųjų Re ir Pr' kriterijų turi tokią išraišką:

$$Nu' = A \cdot Re^m \cdot (Pr')^n. \qquad (20.4)$$

Esant laminariniam vientisosios fazės arba terpės srauto tekėjimui, $m = 1/3$, $n = 1/3$; esant turbulentiniam režimui, Re įtaka Nu' didėja ir $m > 1/3$, o n vertė išlieka kokia buvusi, t. y. $n = 1/3$.

Dažniausiai procesai, kuriuose dalyvauja kietoji fazė, vyksta nejudančiame arba pseudoverdančiajame grūdinės medžiagos sluoksniuose. Todėl nagrinėsime vientisosios fazės arba terpės (skysčių, dujų, garų) masės atidavimo kriterijų lygtis.

Kai procesai vyksta nejudančiame sluoksnyje:

a) jei judančioji fazė yra dujos ir *Re* kinta nuo 3 iki 2000,

$$j_d = St \cdot (Pr')^{2/3} = 0{,}357/\left(\varepsilon \cdot Re^{0{,}36}\right); \qquad (20.5)$$

čia j_d – masės atidavimo veiksnys; $St = Nu'/(Re \cdot Pr')$ – Stentono kriterijus; ε – sluoksnio poringumo koeficientas (m^3/kg, m^3/m^3), kartais vadinamas poringumu, suprantamas kaip bendras porų tūris kūno masės arba tūrio vienete.

Išplėsta forma (20.5) lygtis užrašoma taip:

$$Nu' = (0{,}357/\varepsilon) \cdot Re^{0{,}641} \cdot (Pr')^{1/3}; \qquad (20.6)$$

b) jei judančioji fazė yra skystis:

$$j_d = 1{,}09/\left(\varepsilon \cdot Re^{2/3}\right), \text{ kai } Re \text{ kinta nuo } 0{,}0016 \text{ iki } 55, \qquad (20.7)$$

$$j_d = 0{,}25/\left(\varepsilon \cdot Re^{0{,}31}\right), \text{ kai } Re \text{ kinta nuo } 55 \text{ iki } 1500. \qquad (20.8)$$

Kai procesai vyksta pseudoverdančiajame sluoksnyje:

a) jei judančioji fazė yra skystis ir *Re* kinta nuo 5 iki 120, o $\varepsilon \leq 0{,}84$:

$$Nu' = 2{,}0 + 1{,}5 \cdot (Pr')^{0{,}33} \cdot \left[(1-\varepsilon) \cdot Re\right]^{0{,}5}; \qquad (20.9)$$

b) jei judančioji fazė yra dujos, tai apytikslės masės atidavimo koeficientų vertės gali būti apskaičiuojamos pagal tokias kriterijų lygtis:

$$Nu' = 0{,}374 \cdot Re^{1{,}18}, \text{ kai } Re \text{ kinta nuo } 0{,}1 \text{ iki } 15; \qquad (20.10)$$

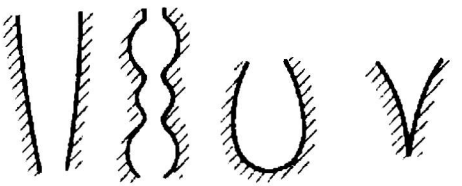
$$Nu' = 2{,}01 \cdot Re^{0{,}5}, \text{ kai } Re \text{ kinta nuo } 15 \text{ iki } 250. \qquad (20.11)$$

20.2. Masės pernaša kietojoje fazėje

Paprastai kietoji fazė masės pernašos procesuose yra poringas kūnas. Poringųjų kūnų struktūra apibūdinama porų forma, kryptimi, tarpusavio išsidėstymu ir tarpusavio susijungimu (20.2 pav.). Pagal formą poros gali būti: vamzdiniai kanalai su vietiniais susiaurėjimais ir paplatėjimais (20.2 pav., *a*); kanalai, sudaryti iš įvairaus skersmens sferų (20.2 pav., *b*); butelio formos (20.2 pav., *c*); *V* formos (20.2 pav., *d*).

Pagal porų kryptį ir tarpusavio išsidėstymą skiriamos izotropinės ir anizotropinės struktūros. Izotropiniuose kūnuose poros tolygiai pasiskirsčiusios visame tūryje ir, skirtingai nuo anizotropinių, neturi vyraujančios krypties. Pagal tarpusavio susijungimą poros skirstomos į iš abiejų galų atviras, arba pernašos, poras ir aklinas poras (20.2 pav., *c, d*).

Poringųjų kūnų struktūra taip pat apibūdinama poringumu, porų pasiskirstymu pagal dydį, savituoju paviršiumi ir porų kreivumu. Poringumas ε_p (m^3/kg arba m^3/m^3), kartais vadinamas poringumo koeficientu, yra bendras porų tūris kūno masės arba tūrio vienete.



20.2 pav. Galimos dalelių porų formos: *a* – vamzdiniai kanalai su vietiniais susiaurėjimais ir paplatėjimais, *b* – iš susijungusių sferų sudaryti kanalai, *c* ir *d* – atitinkamai butelio ir *V* formos kanalai

Porų pasiskirstymui pagal dydį vertinti naudojama integralinė arba diferencialinė porų pasiskirstymo pagal spindulį funkcija. Integralinė pasiskirstymo funkcija ε_r nurodo bendros tikimybės dalį, tenkančią poroms, kurių spindulys yra nuo r_{min} iki momentinio r.

Diferencialinė pasiskirstymo funkcija parodo porų pasiskirstymo pagal spindulius tankį:

$$f(r) = \partial\varepsilon_r / \partial r .$$

Paprastai poringieji kūnai klasifikuojami remiantis porų pasiskirstymu juose pagal dydį. Pavyzdžiui, adsorbcijos procesuose skiriamos mikroporos ($r < 10^{-9}$ m), pereinamosios poros, arba mezoporos ($10^{-9} < r < 10^{-7}$), ir makroporos ($r > 10^{-7}$ m). Džiovinimo procesuose medžiagos skirstomos į poringus ir kapiliariškai poringus kūnus. Poringuosiuose kūnuose sunkio jėga turi daugiau įtakos negu kapiliarinės jėgos, o kapiliariškai poringuose kūnuose – atvirkščiai. Ribinis porų dydis, skiriantis poringuosius ir kapiliariškai poringus kūnus, priklauso nuo kūno dydžio.

Savitasis porų paviršiaus plotas σ (m^2/kg, m^2/m^3) rodo suminį kūno masės arba tūrio vienete esančių porų paviršiaus plotą. Savituoju paviršiaus plotu vertinamas mezo– ir makroporų paviršiaus plotas. Mikroporų, kurių skersmuo yra tos pačios eilės dydis kaip molekulių skersmuo, savitojo paviršiaus, kaip

porų sienelių paviršiaus, supratimas turi neapibrėžtą pobūdį, todėl mikroporėtieji kūnai apibūdinami tik poringumu. Porų kreivumas apibūdinamas kreivumo koeficientu T_k, kuris lygus poros ilgio ir tiesės, jungiančios poros pradžią ir pabaigą, santykiui.

Elementarūs masės pernašos procesai poringuosiuose kūnuose. Nors įvairių kietųjų poringųjų medžiagų, kuriose vyksta skirtingi procesai, yra labai daug, galima skirti bendrus elementarius pernašos būdus: difuziją kietajame kūne, konvekcinę pernašą, laisvą ir ribotą difuziją, paviršinę difuziją ir šiluminę difuziją.

Medžiagos pernašos poringoje arba neporingoje medžiagoje pagrindiniai mechanizmai yra du: a) atomai užima tuščius kristalų gardelės kampus; b) du gretimi atomai pasikeičia vietomis.

Difuzija porėtojo kūno matricoje aprašoma lygtimi, analogiška Fiko dėsniui:

$$g_k = -D_k \cdot \partial C_k / \partial n, \qquad (20.12)$$

arba

$$g_k = -D_k \cdot \rho_d \cdot \partial X / \partial n; \qquad (20.13)$$

čia D_k – difuzijos porėtojoje medžiagoje koeficientas; X ir C_k – paskirstomos medžiagos koncentracija kietojoje fazėje, kg/kg arba kg/m^3; n – difuzijos kelio ilgis; ρ_d – dalelės tankis.

Kadangi D_k yra mažas dydis ($D_k < 10^{-9}$ m^2/s), tai difuzija kietojo poringojo kūno matricoje sudaro nedidelę bendros masės pernašos dalį.

Konvekcinė pernaša atsiranda pasikeitus slėgiui išilgai poros. Jis gali pasikeisti: a) dėl to, kad džiovinimo arba desorbcijos metu šildant kūną, slėgis porų viduje viršija aplinkos slėgį; b) veikiant kapiliarinėms jėgoms; c) esant pleištą išstumiančiam slėgiui.

Konvekcinė pernaša atsiranda tik gana plačiose porose, kada molekulių laisvojo judėjimo kelias λ gerokai mažesnis už poros spindulį ($\lambda/r << 1$). Jeigu $\lambda/r > 1$, tai vyksta molekulinė pernaša.

Vykstant laminariniam (klampiajam) tekėjimui, atsiradusiam dėl slėgių porose ir jų išorėje skirtumo, medžiagos srauto tankis g_m kartu su inertiniu nešikliu išreiškiamas Hageno ir Puazeilio lygtimi:

$$g_m = -\left(\rho_t \cdot r^2 / 8 \cdot \mu\right) \cdot \partial p / \partial n; \qquad (20.14)$$

čia ρ_t – terpės tankis; n – poros ilgis; r – poros spindulys; μ – terpės klampa; $\partial p/\partial n$ – slėgio gradientas poroje.

Sugeriamojo komponento, kurio koncentracija poroje X' (kg/kg inertinio nešiklio), srauto tankis apskaičiuojamas pagal lygtį

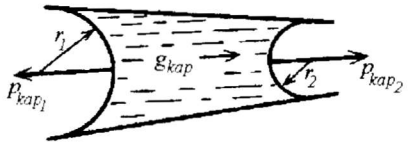
$$g_m = -\left(\rho_t \cdot r^2 / 8 \cdot \mu\right) \cdot \left[X'/(1+X')\right] \cdot \partial p / \partial n . \qquad (20.14a)$$

Jei poros viduje yra kondensato (skysčio), srautas gali judėti, veikiamas kapiliarinių jėgų, kurių slėgis atvirkščiai proporcingas kapiliaro spinduliui:

$$p_{kap1} = \sigma \cdot \cos\theta / r_1 , \quad p_{kap2} = \sigma \cdot \cos\theta / r_2 ;$$

čia σ – paviršiaus įtempis, N/m; θ – drėkinimo kampas.

Dėl to atsiranda kapiliarinis srautas, nukreiptas iš platesnių porų į siauresnes (20.3 pav.).



20.3 pav. Slėgio jėgų pasiskirstymas kietojo kūno porų viduje, veikiant kapiliarinėms jėgoms

Veikiant kapiliarinėms jėgoms susidaręs medžiagos srauto tankis g_{kap} yra proporcingas kapiliarinio slėgio gradientui:

$$g_{kap} = -k_{kap} \cdot grad\ p_{kap} ; \qquad (20.15)$$

čia k_{kap} – proporcingumo koeficientas.

Masės konvekcinio srauto, atsiradusio veikiant bendro kapiliarinio slėgio gradientui, tankis gali būti išreikštas koncentracijos kietojoje fazėje gradientu:

$$g_m = -k_m \cdot \left(\partial p / \partial X\right) \cdot \left(\partial X / \partial n\right); \qquad (20.16)$$

$$g_{kap} = -k_{kap} \cdot \left(\partial p_{kap} / \partial X\right) \cdot \left(\partial X / \partial n\right); \qquad (20.17)$$

čia $k_m = \left(\rho_t \cdot r_p^2 / 8 \cdot \mu\right) \cdot \left[X'/(1+X')\right]$; X' – koncentracija kietajame kūne, kg/kg.

Adsorbuota medžiaga ant porų sienelių sudaro plėvelę, kurios storis kinta pagal porų ilgį. Kadangi slėgis į porų sieneles, tolstant nuo paviršiaus, greitai mažėja net esant nedideliam plėvelės storio pasikeitimui, susidaro didelis pleištą išstumiančio slėgio gradientas. Masės srauto tankis g_{pl}, veikiant pleištą išstumiančiam slėgiui, išreiškiamas koncentracijos kietojoje fazėje tiesine funkcija:

$$g_{pl} = -k_{pl} \cdot \rho_d \, \partial X / \partial n ; \qquad (20.18)$$

čia k_{pl} – proporcingumo koeficientas.

Molekulinė difuzija porų tūryje gali būti laisva ir ribota.

Laisvoji difuzija vyksta gana plačiose porose, kurių spindulys didesnis už laisvąjį molekulių nueitą kelią ($\lambda/r << 1$). Jeigu $\lambda/r >> 1$, tai poras užpildanti fazė nėra vientisa, nes molekulių judėjimas dideliu mastu nusakomas ne jų tarpusavio susidūrimais, o susidūrimais su porų sienelėmis. Šiuo atveju difuzija vadinama ribota.

Laisvoji ir ribotoji difuzijos aprašomos atitinkamomis tiesinėmis lygtimis:

$$g_d = -D \cdot (\varepsilon_p / \mu_D) \cdot \partial c / \partial n = -D' \cdot \partial c / \partial n ; \qquad (20.19)$$

$$g_{d.k} = -D_k \cdot (\varepsilon_p / \mu_D) \cdot \partial c / \partial n = -D'_k \cdot \partial c / \partial n ; \qquad (20.20)$$

čia D ir D_k – molekulinės (laisvosios ir ribotosios) difuzijos koeficientai; $D' = D \cdot (\varepsilon_p / \mu_D)$ ir $D'_k = D_k \cdot (\varepsilon_p / \mu_D) \cdot \partial c / \partial n$ – suvaržytos ir ribotai suvaržytos difuzijos koeficientai; μ_D – difuzijos pasipriešinimo koeficientas; c – koncentracija dujose (skystyje).

Ribotosios difuzijos koeficientas apskaičiuojamas pagal lygtį

$$D_k = (2/3) \cdot r \cdot [8 \cdot R \cdot T / (\pi \cdot M)]^{0,5} ; \qquad (20.21)$$

čia r – poros spindulys.

Skirtingai nuo difuzijos srauto laisvoje dujų erdvėje greičio, aprašomo pirmuoju Fiko dėsniu ($g_d = -D \cdot \partial c / \partial n$), difuzijos greitis porose daug mažesnis, kadangi daugiklis ε_p / μ_D gerokai mažesnis už vienetą. Šio daugiklio skaitiklis (poringumas ε_p) įvertina tai, kad tik dalis vienetinio ploto, per kurį difunduoja medžiaga, yra užimta porų, kitą dalį užima poringojo kūno poras skiriančio kietojo kūno karkasas. Difuzijos pasipriešinimo koeficientas μ_D yra trijų dydžių, įvertinančių difuzijos srauto sulėtėjimą dėl porų kreivumo T_i^2, dėl porų formos nukrypimo nuo cilindro – susiaurėjimų ir paplatėjimų (formos koeficientas μ_f) ir dėl porų sienelių potencialinio lauko įtakos (potencialinio lauko koeficientas μ_p), sandauga:

$$\mu_D = T_i^2 \cdot \mu_f \cdot \mu_p . \qquad (20.22)$$

Kartu su laisvąja ir ribotąja difuzija porų tūryje taip pat egzistuoja difuzinis srautas jų paviršiuje, kadangi adsorbuotos molekulės dalyvauja šiluminiame judėjime. Adsorbuojant dujas paviršiaus difuzija vaidina didesnį, galima sakyti, net vyraujantį, vaidmenį.

Paviršinei difuzijai masės srauto tankis g_p gali būti išreikštas tiesiniu gradientiniu dėsniu:

$$g_p = -\left(D_p / T_{p.k}\right) \cdot \partial c_k / \partial n = -D'_p \cdot \rho_d \cdot \partial X / \partial n; \qquad (20.23)$$

čia D_p – paviršiaus difuzijos koeficientas; $T_{p.k}$ – porų kreivumo koeficientas, vykstant paviršiaus difuzijai; $D'_p = D_p / T^2_{p.k}$ – efektyvusis paviršiaus difuzijos koeficientas; c_k – koncentracija kietajame kūne, kg/m^3.

Jeigu poringajame kūne temperatūrų laukas yra nevienalytis (netolygus), susidaro šiluminės difuzijos masės srautas, kurio tankis

$$g_s = -k_s \cdot \rho_d \cdot \partial t / \partial n; \qquad (20.24)$$

čia k_s – šiluminės difuzijos koeficientas, m^2/(s·K).

Masės laidžio lygtis. Kadangi visos elementarios pernašos rūšys nusakomos tiesinėmis gradientų lygtimis nuo (20.13) iki (20.16), (20.20), (20.23), (20.24), jas galima užrašyti sumine lygtimi:

$$\begin{aligned} g = &-D_k \cdot \rho_d \cdot \partial X / \partial n - k_m \cdot (\partial p / \partial X) \cdot (\partial X / \partial n) - \\ &- k_{las} \cdot (\partial p_{las} / \partial X) \cdot (\partial X / \partial n) - k_{pl} \cdot \rho_d \cdot (\partial X / \partial n) - \\ &- D' \cdot (\partial c / \partial n) - D'_p \cdot \rho_d \cdot (\partial X / \partial n) - k_s \cdot \rho_d \cdot (\partial t / \partial n). \end{aligned} \qquad (20.25)$$

Išreiškę koncentracijos gradientą dispersijos terpėje arba vientisojoje fazėje koncentracijos gradientu kietojoje fazėje, gausime efektyvaus masės laidžio lygtį:

$$g = -k_{ef} \cdot \rho_d \cdot (\partial X / \partial n) - k_s \cdot \rho_d \cdot (\partial t / \partial n); \qquad (20.26)$$

čia $k_{ef} = D_k + (k_m / \rho_d) \cdot (\partial p / \partial X) + (k_{las} / \rho_d) \cdot (\partial p_{las} / \partial X) \cdot (\partial X / \partial n) + k_{pl} + (D' / \rho_d) \cdot (\partial c / \partial X) + D'_p$ – efektyvusis masės laidžio koeficientas, m^2/s.

Daliniu atveju, kai procesas yra izoterminis, nesant konvekcinio pernešimo ir laikant, kad porose fazės yra pusiausviros, masės laidžio lygtis užrašoma taip:

$$g = -k \cdot \rho_d \cdot \partial X / \partial n; \qquad (20.27)$$

čia $k = D' / (\rho_d \cdot \Gamma) + D'_p + D_k$ – masės laidžio koeficientas (efektyviosios difuzijos koeficientas $D_{k.ef}$), m^2/s; $\Gamma = \partial X / \partial c$ – pusiausviros priklausomybės $x^* = f(c)$ išvestinė.

Masės laidžio koeficientas $k = D_{k.ef} \cdot \rho_d$ priklauso nuo poringojo kūno cheminės kilmės, jo struktūros, poras užpildančio skysčio arba dujų savybių, pernešamosios medžiagos koncentracijos.

Taigi pagal (20.27) lygtį galima apskaičiuoti, kiek medžiagos nuo kietosios medžiagos paviršiaus pereina į vientisąją fazę. Perėjusios medžiagos kiekį taip pat galima išreikšti masės atidavimo lygtimi (20.1):

$$g = -D_{k.ef} \cdot \rho_d \cdot \partial X / \partial n = \beta_t \cdot (c_p - c). \qquad (20.28)$$

Panašiai pertvarkę (20.28) lygtį, gausime nedimensinį kompleksą, būdingą masės pernešimo procesui, kuriame dalyvauja kietoji fazė:

$$-D_{k.ef} \cdot \rho_d \cdot \partial X / \partial n \approx D_{k.ef} \cdot \rho_d \cdot c / l, \qquad \beta_t \cdot (c_p - c) \approx \beta \cdot c;$$

iš čia $\beta \cdot l / (D_{k.ef} \cdot \rho_d) = Bi'$.

Nedimensinis kompleksas $\beta \cdot l / (D_{k.ef} \cdot \rho_d) = Bi'$ vadinamas difuziniu Bio kriterijumi, kurio forma yra tokia pat kaip difuzinio Nuselto kriterijaus – $Nu'' = \beta \cdot l / D$. Tačiau tarp šių kriterijų yra principinis skirtumas: į Nuselto kriterijų įrašyti dydžiai priskirti vienai fazei, o į Bio kriterijų įeina masės atidavimo skystyje koeficientas β ir medžiagos difuzijos kietojoje fazėje koeficientas $D_{k.ef}$. Dydžiai $l / D_{k.ef}$ ir l / β išreiškia pasipriešinimą masės pernešimui. Pasipriešinimą sąlygoja vidinė $l / D_{k.ef}$ ir išorinė l / β difuzijos. Taigi Bio kriterijus apibūdina vidinės difuzijos pasipriešinimo santykį su išorinės difuzijos pasipriešinimu. Jeigu $l / D_{k.ef} >> l / \beta$, tai Bi' vertė didelė ir procesas yra ribojamas vidinės difuzijos. Jeigu $l / \beta >> l / D_{k.ef}$, tai Bi' vertė maža ir procesas yra ribojamas išorinės difuzijos. Manoma, kad vidinės difuzijos pasipriešinimas yra vyraujantis, kai $Bi' \geq 20$, o išorinės difuzijos pasipriešinimas pradeda vyrauti, kai $Bi' \leq 1{,}0$.

Diferencialinė masės laidžio lygtis. Pernešamosios medžiagos koncentracijų laukas aprašomas diferencialine masės laidžio lygtimi, kuri išvedama taip pat kaip molekulinės difuzijos lygtis (žr. 3.2 sk.), atsižvelgiant į k priklausomybę nuo koncentracijos:

$$\partial X / \partial \tau = div[k(X) \cdot gradX]. \qquad (20.29)$$

Esant konvekciniam pernešimui porose, (20.28) lygtyje masės laidžio koeficientas pakeičiamas efektyviojo masės laidžio koeficientu k_{ef}.

Kai masės laidžio koeficientas yra pastovus, (20.29) lygtis užrašoma taip:

$$\partial X / \partial \tau = k \cdot \nabla_X^2. \qquad (20.29a)$$

Jei procesas neizoterminis, taip pat būtina atsižvelgti į šiluminę difuziją:

$$\partial X/\partial \tau = k \cdot \nabla_X^2 + k_k \cdot \nabla_t^2 . \qquad (20.30)$$

Norint nustatyti neizoterminių procesų koncentracijų lauką, reikia žinoti temperatūrų lauką, todėl (20.30) lygtis sprendžiama kartu su šiluminio laidžio lygtimi.

Sprendžiama diferencialinė masės laidžio lygtis turi būti papildyta pradinėmis ir ribinėmis sąlygomis ir medžiagų balanso lygtimi. Pradinė proceso sąlyga yra pastovi pradinė koncentracija kietojoje fazėje:

$$X(x,0) = X_p = const . \qquad (20.31)$$

Dažnai, sprendžiant diferencialinę masės laidžio lygtį, ribinės sąlygos būna tokios:

a) koncentracija kietosios fazės paviršiuje:

$$X_p = f(\tau); \qquad (20.32)$$

b) pagal masės laidžio ir masės atidavimo lygtis apskaičiuoti masės srautai fazių sąlyčio paviršiuje:

$$-k \cdot \rho_d \cdot (\partial X/\partial \tau)_p = \beta_t \cdot (c_p - c). \qquad (20.33)$$

Diferencialinės masės laidžio lygties sprendinys gaunamas nedimensinio koncentracijų komplekso (E) priklausomybės nuo difuzinio Bio (Bi') ir Furjė (Fo') kriterijaus, nustatomo atliekant panašų pertvarkymą (20.29a), pavidalu:

$$E = f(Bi', Fo'); \qquad (20.34)$$

$$Fo' = D_{k.e} \cdot \tau / l^2 . \qquad (20.35)$$

Nedimensinio koncentracijų komplekso E išraiška priklauso nuo uždavinio formulavimo. Pavyzdžiui, sprendžiant diferencialinę masės laidžio lygtį, esant (20.32) lygtyje pateiktoms ribinėms sąlygoms ir tiesinei pusiausvirai priklausomybei, kai kietoji fazė liečiasi su pastovios koncentracijos c_p terpe, nedimensinis kompleksas išreiškiamas tokia lygtimi:

$$E = \left[\overline{X}(\tau) - X^*(c_p)\right] / \left[X_p - X^*(c_p)\right]; \qquad (20.36)$$

čia $\overline{X}(\tau)$ – vidutinė momentinė koncentracija, kg/kg.

Sistemų su kietuoju kūnu masės perdavimo lygtis. Masės laidžio lygtį išspręsti būna labai sunku, kai tarp kietosios fazės sluoksnio ir srauto vyksta periodiniai masės mainai. Šiuo atveju koncentracijos pasiskirstymas aparato ilgyje ir proceso metu nustatomas iš masės perdavimo lygties.

Procesų, kuriuose dalyvauja kietoji fazė, masės perdavimo lygtį galima gauti, laikant, kad masės srauto kietajame kūne tankis aprašomas masės atidavimo lygtimi. Taip pat laikydami, kad fazės fazių kontakto paviršiuje yra pusiausviros (20.4 pav.), gausime:

$$dM/d\tau = d(V \cdot \rho_p \cdot X)/d\tau = \beta_t \cdot (c - c_p) \cdot V \cdot f = \\ = \beta_{t_K} \left[c_K^*(c_p) - c_p\right] \cdot V \cdot f; \qquad (20.37)$$

čia ρ_p – kietosios fazės piltinis tankis, kg/m^3; f – kietosios fazės išorinis savitasis paviršius, m^2/m^3.

Atsižvelgdami į tai, kad $c_K = X \cdot \rho_p$ ir $X^*(c_p)/c_p = X/c^*(X) = \Gamma$, iš (20.37) lygties gausime masės perdavimo lygtį:

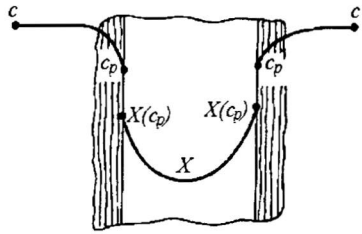
$$g = (\rho_p / f) \cdot dX/d\tau = \left[c - c^*(X)\right]/\left[(1/\beta_t) + (1/\beta_x)\right] = \\ = K_t \cdot \left[c - c^*(X)\right], \qquad (20.38)$$

arba

$$g = K_t \cdot \left|c - c^*(X)\right|;$$

čia $\beta_x = \beta_{t_K} \cdot \rho_p \cdot \Gamma$ – vidinio masės atidavimo koeficientas, m/s; K_t – masės perdavimo koeficientas, m/s:

$$K_t = 1/\left[(1/\beta_t) + (1/\beta_x)\right]. \qquad (20.39)$$



20.4 pav. Masės perdavimo poroje principinė schema

Vidinio masės atidavimo koeficiento β_x ryšys su masės laidžio koeficientu aprašomas lygtimi

$$\beta_t = 10 \cdot k \cdot \rho_p \cdot \Gamma/\left[d \cdot (1 - \varepsilon)\right]; \qquad (20.40)$$

čia d – granulės skersmuo, m; ε – sluoksnio poringumo koeficientas.

Įvertinus (20.27) lygtį, gaunama:

$$\beta_x = \frac{\left[D'/(\rho_d \cdot \Gamma) + D'_p + D_k\right] \cdot 10 \cdot \rho_p \cdot \Gamma}{d \cdot (1-\varepsilon)} = \frac{10 \cdot D'}{d} + \\ + \frac{10 \cdot (D'_p + D_k) \cdot \rho_p \cdot \Gamma}{d \cdot (1-\varepsilon)} = \beta_p + \beta_k; \qquad (20.41)$$

čia $\beta_p = 10 \cdot D'/d$ – masės atidavimo porose koeficientas, m/s; $\beta_k = 10 \cdot (D'_p + D_k) \cdot \rho_p \cdot \Gamma / d \cdot (1-\varepsilon)$ – masės atidavimo kietajame kūne koeficientas, m/s.

Reikia pasakyti, kad (20.41) priklausomybė galioja tik tiesinėms izotermoms ($\Gamma = const$).

Kai adsorbuojamos lėtai sorbuojamos medžiagos, kai medžiagos srauto paviršiuje galima nepaisyti, taip pat ekstrahuojant iš kietosios fazės, masės pernaša kietajame kūne yra ribojama porose vykstančios difuzijos:

$$\beta_x \cong \beta_p .$$

Masės pernašos neporėtuose kūnuose proceso greitis paprastai yra nusakomas difuzija kietajame kūne, naudojant masės laidžio lygtį, todėl

$$\beta_x \approx \beta_k = 10 \cdot D_k \cdot \rho_p \cdot \Gamma / [d \cdot (1-\varepsilon)].$$

Daugeliu atvejų vidinio masės atidavimo koeficientas β_x apskaičiuojamas pagal (20.40) lygtį, naudojant bandymais nustatytus masės laidžio koeficientus. Skaičiuojant masės mainų procesus, kuriuose dalyvauja kietoji fazė, kaip ir kitus masės mainų procesus, naudojami tūriniai masės atidavimo ir masės perdavimo koeficientai $\beta_{V\,t}$ ir $K_{V\,t}$ ir t. t.

21 DALIS

ADSORBCIJA IR JONŲ MAINAI

Adsorbcija yra procesas, kurio metu kietasis kūnas (adsorbentas) porų paviršiumi arba tūriu sugeria dujas, garus arba ištirpusias medžiagas. Dujose, garuose arba skystyje esanti sugeriamoji medžiaga vadinama adsorbtyvu, o absorbento sugerta medžiaga – adsorbatu.

Adsorbcija skirstoma į fizikinę ir cheminę. Fizikinę adsorbciją sąlygoja paviršinės van der Valso jėgos, kurių veikimas pasireiškia atstumu, gerokai viršijančiu adsorbuojamosios medžiagos molekulių dydį, todėl adsorbento paviršiuje sulaikomi keli adsorbato molekulių sluoksniai. Cheminės adsorbcijos metu sugeriama medžiaga reaguoja su adsorbentu jo paviršiuje ir susidaro cheminiai junginiai.

Traukos jėgos adsorbento paviršiuje atsiranda todėl, kad paviršiuje esančius atomus ir molekules iš įvairių pusių veikia skirtingo dydžio jėgos, t. y. paviršiuje esančių molekulių jėgų laukas nėra išlygintas gretimų dalelių veikimo. Pagal fizikinę prigimtį adsorbuojamosios medžiagos ir adsorbento molekulių sąveikos jėgos priskiriamos prie dispersinių jėgų, atsirandančių persikeliant elektronams suartėjusiose molekulėse. Kai kuriais adsorbcijos atvejais didelę reikšmę turi elektrostatinės ir indukcinės jėgos, taip pat vandeniliniai ryšiai.

Adsorbento paviršių užpildžius adsorbatui, paviršiaus jėgos iš dalies susilygina (atkuriama pusiausvyra), todėl sumažėja paviršiaus įtempis (laisvoji savitoji paviršiaus energija). Taigi adsorbcija yra savaime vykstantis procesas, kurio metu sumažėja sistemos laisvoji energija ir entropija.

Sumažėjus sistemos laisvajai energijai ir entropijai taip pat sumažėja jos entalpija ($\Delta H = \Delta G + T \cdot \Delta S$, $\Delta H < 0$), o tai tolygu šilumos išsiskyrimui, t. y. adsorbcijos procesai yra egzoterminiai.

Adsorbcijos procesai yra selektyvūs, arba atrankūs, ir grįžtami procesai. Adsorbcijos grįžtamasis procesas vadinamas desorbcija, kuri naudojama sugertai medžiagai išskirti ir adsorbentui regeneruoti.

Adsorbciją geriausia naudoti apdoroti mišiniams, kuriuose išgaunamų komponentų koncentracija nedidelė. Šiuo atveju pailgėja adsorbcijos aparato – adsorberio adsorbcijos stadijos darbo trukmė prieš jį perjungiant desorbcijai.

Tipiniais adsorbcijos procesais laikomas dujų ir skysčių džiovinimas; angliavandenilių mišinių perskyrimas; tirpiklių rekuperacija; išmetamų technologinių dujų ir vandenų valymas ir t. t. Pastaruoju metu adsorbcijos procesų reikšmė padidėjo, ypač kai reikia spręsti ekologines problemas ir gauti labai švarias medžiagas.

Dalinis chemosorbcijos atvejis yra jonų mainai tarp kieto sorbento (jonito) ir elektrolito tirpalo. Jonų mainų procesų kinetika ir aparatai yra panašūs į adsorbcijos proceso kinetiką ir aparatus.

Pramonėje naudojami gamtiniai jonų mainų sorbentai (jonitai): ceolitai, bentonitiniai moliai, titano, cirkonio fosfatai ir kt., taip pat sintetiniai sorbentai, tarp kurių vyrauja polimerai. Sintetiniai sorbentai – jonitai yra makromolekulių polimerinė matrica su trijų matmenų struktūra, turinčia jonogeninių grupių. Tirpale jonitai sudaro nejudrius makromolekulinius jonus ir priešingo ženklo judrius jonus. Pramonėje vyrauja ir sintetinių dervų pagrindu pagaminti jonitai. Jonitai, gebantys pasikeisti su tirpalu katijonais, vadinami katijonitais, o gebantys pasikeisti anijonais, – anijonitais.

Jonų mainai plačiai naudojami daugelio neorganinių ir organinių medžiagų gamyboje, katalizėje – gaminant kai kuriuos medicinos preparatus, energetikoje – valant į katilus tiekiamą vandenį, elektronikoje bei radiochemijoje – valant naudotus vandenis. Vienas iš didžiausių jonų mainų procesų trūkumų yra būtinybė dažnai regeneruoti jonitus, o po to plauti; dėl to padidėja šarmų arba rūgščių sąnaudos ir valomo vandens tūriai.

21.1. Adsorbcija

21.1.1. Pagrindiniai pramoniniai adsorbentai ir jų savybės

Adsorbentai yra poringieji kūnai, turintys didelį mikroporų tūrį. Adsorbentų savybės priklauso nuo medžiagų, iš kurių jie pagaminti, ir vidinių porų struktūros (19 dalis).

Pramoniniuose adsorbentuose pagrindinė sugeriamosios medžiagos masė adsorbuojama ant mikroporų ($r < 10^{-9}$ m) sienelių. Pereinamosiomis poromis ($10^{-9} < r < 10^{-7}$ m) ir makroporomis ($r > 10^{-7}$ m) adsorbuojamosios medžiagos pereina į mikroporas.

Adsorbentai apibūdinami sugertimi, arba sorbcine geba, kuri nusakoma maksimalia adsorbtyvo koncentracija adsorbento masės arba tūrio vienete. Adsorbento sorbcinė geba priklauso nuo adsorbento kilmės ir jo porų struktūros, sugeriamosios medžiagos kilmės, jos koncentracijos ir proceso temperatūros, o dujų ir garų – nuo garų ir skysčio mišinio slėgio. Maksimaliai galima tyrimo sąlygomis adsorbento sugerties geba sąlygiškai vadinama pusiausviruoju aktyvumu.

Pagal cheminę sudėtį adsorbentai skirstomi į anglinius (aktyvintosios anglys, anglinės pluoštinės medžiagos, taip pat kai kurios kietojo kuro rūšys) ir ne anglinius (silikageliai, aktyvusis aliuminio oksidas, aliuminio geliai, ceolitai, molingosios padermės).

Aktyvintosios anglys. Aktyvintąsias anglis sudaro netvarkingai išsidėsčiusių grafito mikrokristalų visuma. Paprastai jos naudojamos organinėms medžiagoms sugerti, valant arba perskiriant skysčius, dujas arba garus. Šie adsorbentai gaunami sausai distiliuojant organines medžiagas (medieną, akmens anglis, gyvulių kaulus, vaisius ir kt.), pašalinant lakiąsias medžiagas. Po to anglys aktyvinamos, pvz., jas pakaitinant 850...900 °C temperatūroje. Tokio proceso metu iš esamų porų pašalinamos dervos ir susidaro naujos mikroporos. Taip pat galima aktyvinti iš porų organiniais tirpikliais ekstrahuojant dervas arba jas oksiduojant oro deguonimi ir kt. Tolygesnė anglių struktūra gaunama aktyvinant cheminiais metodais: apdorojant jas karštais druskų (pvz., sulfatų,, nitratų ir kt.) tirpalais arba mineralinėmis rūgštimis (sieros, azoto ir kt.).

Savitasis aktyvintųjų anglių paviršiaus plotas yra labai didelis ir siekia nuo $6 \cdot 10^5$ iki $17 \cdot 10^5$ m^2/kg, o piltinis tankis – nuo 200 iki 900 kg/m^3. Aktyvintosios anglys būna nuo 1 iki 7 mm dydžio netaisyklingos formos dalelių; nuo 2 iki 3 mm skersmens rutuliukų; nuo 4 iki 6 mm aukščio cilindrų; smulkesnių kaip 0,15 mm miltelių pavidalo.

Didžiausi aktyvintųjų anglių trūkumai yra jų degumas, nedidelis mechaninis stipris.

Silikagelis yra vandens netekęs silicio rūgšties ($SiO_2 \cdot nH_2O$) gelis. Jis naudojamas adsorbuoti poliniams junginiams, džiovinti dujoms arba skysčiams, perskirti organinėms medžiagoms dujų fazėje, taip pat chromatografijoje. Silikagelis gaminamas natrio silikato (tirpaus stiklo) tirpalą apdorojant sieros (kai kada druskos) rūgštimi arba rūgščių druskų tirpalais. Susidaręs gelis plaunamas vandeniu ir džiovinamas iki galutinio 5...7 % drėgnio, nes tokio drėgnio silikagelio adsorbcinė geba būna didžiausia. Savitasis silikagelio paviršius būna nuo $4 \cdot 10^5$ iki $7{,}7 \cdot 10^5$ m^2/kg, o piltinis tankis – nuo 400 iki 800 kg/m^3. Silikagelio granulės būna netaisyklingos formos (nuo 0,2 iki 7 mm) ir rutulio arba apvalios formos (nuo 2 iki 7 mm).

Silikagelis yra nedegus, mechaniškai stipresnis už aktyvintąsias anglis, tačiau jo savitasis paviršius mažesnis.

Pagal adsorbcines savybes silikageliams artimi yra aliuminio geliai, gaunami termiškai apdorojant aliuminio hidroksidą ($Al(OH)_3$) 600...1000 °C temperatūroje. Gauto sorbento porų skersmuo būna nuo 1 iki 3 nm, savitasis paviršius – nuo $2 \cdot 10^5$ iki $4 \cdot 10^5$ m^2/kg, o piltinis tankis – apie 1600 kg/m^3. Aliuminio geliai naudojami dujoms džiovinti, vandeniniams tirpalams ir mineralinėms alyvoms valyti, taip pat kaip katalizatoriai arba jų nešikliai.

Ceolitais vadinami gamtiniai arba sintetiniai mineralai (pvz., hidroaliumosilikatai), turintys šarminių ir šarminių žemių metalų oksidų. Šie adsorbentai pasižymi reguliaria porų, kurių dydis sutampa su sugeriamųjų molekulių dydžiu, struktūra. Ceolitų savitumą sudaro tai, kad adsorbciniai paviršiai tarpusavyje sujungti tam tikro skersmens langais, pro kuriuos gali prasiskverbti tik mažesnio dydžio molekulės. Tuo remiasi skirtingo dydžio molekulių mišinių perskyrimas pagal molekulių dydį, todėl ceolitai kai kada vadinami molekuliniais sietais.

Dujų mišiniams perskirti naudojami nuo 1 iki 5 mm skersmens ceolitų rutuliukai arba granulės, o skysčio mišiniams perskirti – smulkūs milteliai.

Ceolitai dažnai naudojami dujoms ir skysčiams džiovinti, artimos molekulių masės medžiagų mišinių valymo ir perskyrimo procesuose, taip pat kaip katalizatoriai ir jų nešikliai.

Įvairioms priemaišoms iš skysčių valyti kaip adsorbentai naudojamos gamtinės molingosios padermės. Šie moliai aktyvinami apdorojant juos sieros arba druskos rūgštimis, ir gaunami nuo $1 \cdot 10^5$ iki $1{,}5 \cdot 10^5$ m^2/kg savitojo paviršiaus adsorbentai.

Adsorbentai dar apibūdinami statiniu ir dinaminiu aktyvumu. Statinis aktyvumas yra adsorbento masės arba tūrio vieneto sugertas medžiagos kiekis nuo adsorbcijos pradžios, iki pasiekiama pusiausvyra. Šis aktyvumas nustatomas statinėmis sąlygomis, t. y. dujoms arba skysčiui nejudant. Judant mišiniui per adsorbento sluoksnį po tam tikro laiko intervalo adsorbentas pradeda sugerti ne visą išgaunamą komponentą ir šis ima „peršokti". Dėl to didėja komponento koncentracija iš adsorbento ištekančio mišinio sraute, iki pasiekiama pusiausvyra. Adsorbento masės arba tūrio vieneto sugertas medžiagos kiekis nuo adsorbcijos pradžios iki to momento, kol adsorbtyvo koncentracija ima didėti iš absorbento ištekančiame sraute, vadinamas adsorbento dinaminiu aktyvumu. Dinaminis aktyvumas visada yra mažesnis už statinį, todėl reikalingas adsorbento kiekis apskaičiuojamas pagal jo dinaminį aktyvumą.

21.1.2. Adsorbcijos pusiausvyra

Absorbento sugertos medžiagos pusiausviroji koncentracija X^* (kg/kg) gali būti išreikšta koncentracijos c ir temperatūros T funkcija:

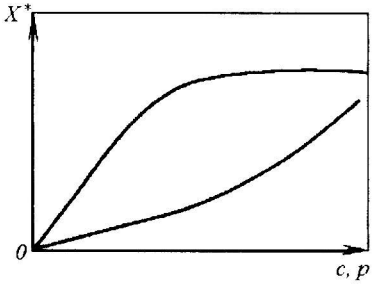
$$X^* = f(c,T). \qquad (21.1)$$

Kai adsorbuojamos dujos, ši koncentracija išreiškiama dalinio slėgio p ir temperatūros T funkcija:

$$X^* = f(p,T); \qquad (21.1a)$$

čia c – adsorbtyvo koncentracija vientisojoje fazėje, kg/m^3; p – adsorbtyvo dalinis slėgis vientisojoje fazėje, Pa.

Priklausomybė $X^* = \varphi(c)$ arba $X^* = \varphi(p)$, esant pastoviai temperatūrai, vadinama adsorbcijos izoterma.



21.1 pav. Iškiloji ir įgaubtoji adsorbcijos izotermos

Adsorbcijos izoterma yra kreivė, kurios forma priklauso nuo adsorbato ir adsorbento kilmės ir nuo pastarojo porų struktūros. Izotermos būna labai įvairių formų. Adsorbcijos procesų analizei reikia skirti iškilios ir įgaubtos formos izotermas (21.1 pav.). Pradinės izotermų atkarpos yra tiesės.

Pusiausvyros priklausomybės aprašomos keletų lygčių. Geriausiai adsorbcijos procesų pusiausvyrą aprašo porų tūrio užpildymo teorija. Pagal ją, adsorbcijos potencialas A yra adsorbcijos jėgų atliktas darbas, pernešant vieną molį adsorbtyvo iš pusiausviro slėgio p dujinės fazės į adsorbcinę plėvelę, virš kurios susidaręs slėgis prilyginamas sočiųjų adsorbtyvo garų slėgiui p_S, esant tyrimo temperatūrai T.

Adsorbcijos potencialas išreiškiamas priklausomybe

$$A = R \cdot T \cdot ln(p_S / p). \qquad (21.2)$$

Adsorbcijos proceso metu mikroporų tūris V_P užpildomos adsorbatu, kurio tūrį galima apskaičiuoti pagal pusiausvirosios adsorbcijos dydį:

$$V_P = \left(X^* / M\right) \cdot V_{SK}; \qquad (21.3)$$

čia M – molekulinė adsorbato masė; V_{SK} – adsorbato molio tūris.

Nustatyta, kad tuo pačiu adsorbentu adsorbuojant įvairias medžiagas, adsorbcijos potencialų santykis, esant pastoviam porų tūriui V_P, yra pastovus ir lygus gimiringumo koeficientui β_α, kuris atitinka tiriamosios ir standartinės medžiagos molių tūrių skystojoje fazėje santykį.

Daugelio adsorbentų mikroporų pasiskirstymas pagal dydį aprašomas Gauso pasiskirstymo dėsniu:

$$V_p = V_0 \cdot \exp\left(-A/B\right)^2; \qquad (21.4)$$

čia V_0 – bendras mikroporų tūris; B – pasiskirstymo funkcijos parametras.

Kartu išsprendus (21.2)...(21.4) lygtis, įvertinant gimiringumo koeficientą, kai naudojamas mikroporėtas tolydžios porų struktūros adsorbentas, gaunama adsorbcijos izotermą aprašanti lygtis:

$$X^* = V_0 / V_{sk} \cdot e^{-B \cdot (T/\beta_a)^2 \cdot (\ln p_S / p)^2} ; \qquad (21.5)$$

čia $B = (2{,}303 \cdot R/E)^2$ – adsorbento poras apibūdinanti konstanta.

Kartu su santykiais, užrašytais pagal porų tūrio užpildymo teoriją, adsorbcijos pusiausvyrai aprašyti naudojamos ir kitos lygtys, iš kurių geriausiai žinoma yra Lengmiūro lygtis:

$$X^* = X_0 \cdot k \cdot p \cdot (1 + k \cdot p); \qquad (21.6)$$

čia X_0 – ribinis adsorbcijos dydis (adsorbuoto komponento, kuris visą adsorbento paviršių padengia monomolekuliniu adsorbato sluoksniu, kiekis); k – nuo temperatūros priklausanti konstanta.

Daugelio komponentų mišinių adsorbcijos pusiausvyrai aprašyti (ypač adsorbuojant dujas arba garus) taip pat naudojama Freindlicho lygtis:

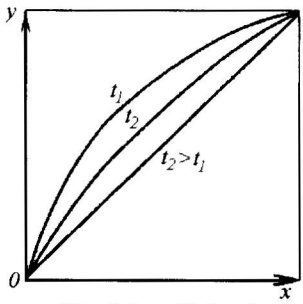
$$\lg X^* = \lg k + n \cdot \lg p ; \qquad (21.7)$$

čia k ir n – iš žinynų parenkami dydžiai.

Daugelio komponentų mišinių adsorbcijos pusiausvyrą skaičiuoti labai svarbu mišinių (skysčių ir dujų) perskyrimo procesuose. Adsorbento selektyvumas (atrankumas) įvertinamas perskyrimo koeficientu a:

$$a = y_2 \cdot x_1 / (x_2 \cdot y_1); \qquad (21.8)$$

čia x_1, y_1 ir x_2, y_2 – atitinkamai geriau ir blogiau adsorbuojamos medžiagos molinė koncentracija kietojoje fazėje ir dujose (garuose, skystyje).



21.2 pav. Binarinių mišinių adsorbcijos pusiausvyros diagrama

Tais atvejais, kai skiriamajame mišinyje yra du adsorbtyvai, kaip ir binarinių mišinių, sistemų *skystis-garai* pusiausvyra grafiškai pavaizduojama fazių diagramoje y–x. Jeigu fazių sudėtys išreiškiamos sunkiau adsorbuojamo komponento molio dalimis (analogiškai distiliacijoje – žemesnės virimo temperatūros *ŽVK* arba „lakesnio" komponento), adsorbcijos pusiausvyros kreivės išsidėsto aukščiau įstrižainės (21.2 pav.), o jų kreivumas priklauso nuo dydžio a, apskaičiuojamo pagal (21.8) lygtį.

Iš 21.2 pav. galima padaryti išvadą, kad, didėjant temperatūrai, perskyrimo koeficientas a mažėja. Analogiškai a kitimui įtakos turi ir slėgio didėjimas.

Monomolekulinės adsorbcijos atveju Lengmiuro lygtis (21.6), galiojanti individualioms medžiagoms, gali būti pertvarkyta (transformuota) į mišinių adsorbcijai galiojančią lygtį:

$$X_i^* = X_0 \cdot k_i \cdot p_i \Big/ \left(1 + \sum_i^n k_i \cdot p_i\right). \qquad (21.9)$$

Binariniams mišiniams (21.9) lygtis užrašoma taip:

$$X_1^* = X_0 \cdot k_1 \cdot p_1 / (1 + p_1 \cdot k_1), \qquad (21.10)$$

$$X_2^* = X_0 \cdot k_2 \cdot p_2 / (1 + k_2 \cdot p_2). \qquad (21.11)$$

Iš šių lygčių, esant bendram slėgiui pastoviam, gaunama Ljuiso lygtis, išreiškianti binarinių mišinių komponentų dydžių tiesinę priklausomybę:

$$\left(X_1^* / X_1^0\right) + \left(X_2^* / X_2^0\right) = 1; \qquad (21.12)$$

čia X_1^0, X_2^0 – individualių komponentų pusiausvirosios koncentracijos, kai bendras slėgis lygus komponentų dalinių slėgių sumai.

Ljuiso lygtis naudojama ne tik Lengmiūro lygtimi aprašomom, bet ir kitų tipų izotermoms aprašyti. Naudojant Ljuiso lygtį, galima sudaryti apytikslę binarinių mišinių adsorbcijos kreivę, pagrindu imant individualių komponentų izotermas. Tam tikslui iš (21.12) lygties gaunamos lygtys koncentracijoms X_1^* *ir* X_2^* apskaičiuoti:

$$X_1^* = \frac{x_1}{x_1 / X_1^0 + (1 - x_1) / X_2^0}; \qquad (21.13)$$

$$X_2^* = \frac{x_2}{x_2 / X_2^0 + (1 - x_2) / X_1^0}; \qquad (21.14)$$

čia x_1 ir x_2 – komponento molio dalys adsorbate.

Individualių komponentų izotermos išreiškiamos tokiomis funkcijomis:

$$X_1^* = f_1(p_1), \quad X_2^* = f_2(p_2).$$

Jeigu funkcijos f_1^{-1} ir f_2^{-1} laikomos atvirkščiomis funkcijoms f_1 ir f_2, gaunamos adsorbcijos pusiausvyros bendro pavidalo lygtys:

$$y_1^* = \frac{1}{p} \cdot f_1^{-1}\left[\frac{x_1}{x_1 / X_1^0 + (1 + x_1) / X_2^0}\right]; \qquad (21.15)$$

$$y_2^* = \frac{1}{p} \cdot f_2^{-1}\left[\frac{x_2}{(1-x_2)/X_1^0 + x_2/X_2^0}\right]. \qquad (21.16)$$

X_1^0 *ir* X_2^0 apskaičiuojami pagal individualių komponentų izotermas:

$$X_1^0 = f_1(p_1 + p_2) \quad \text{ir} \quad X_2^0 = f_2(p_1 + p_2).$$

21.1.3. Adsorbcijos medžiagų balansas

Pramonėje dažniausiai naudojami adsorberiai su nejudančiuoju, pseudoverdančiuoju ir judančiuoju adsorbento sluoksniu. Adsorberiuose su nejudančiuoju adsorbento sluoksniu vientisosios fazės srautas, turintis adsorbtyvo, periodiškai prateka pro grūdinį adsorbento sluoksnį. Sudarant šiam atvejui medžiagų balansą, laikoma, kad vientisoji fazė juda izoterminėmis sąlygomis pagal idealaus išstūmimo modelį.

Nagrinėsime sluoksnio elementą, kurio skerspjūvio plotas S, o aukštis dx. Sluoksnio poringumą pažymėsime ε (vieneto dalimis), tada vientisosios fazės tūris sluoksnio elemente bus lygus $\varepsilon \cdot S \cdot dx$, o dispersinės fazės – $(1-\varepsilon)\cdot S \cdot dx$. Tarkime, kad vidutinė koncentracija vientisojoje fazėje yra lygi c, kg/m^3, o dispersinėje fazėje – c_K, kg/m^3.

Konvekcinis adsorbtyvo srautas į tūrio elementą $S \cdot dx$ apskaičiuojamas pagal išraišką $w \cdot (\partial c/\partial x)\cdot S \cdot dx$, o molekulinis srautas arba srautas dėl molekulinės difuzijos – pagal $D \cdot (\partial^2 c/\partial x^2)\cdot \varepsilon \cdot S \cdot dx$. Abiejų srautų suma bus lygi tiriamame tūryje pernešamo komponento masės kitimo greičiui:

$$(\partial c/\partial \tau)\cdot \varepsilon \cdot S \cdot dx + (\partial c_K/\partial \tau)\cdot (1-\varepsilon)\cdot S \cdot dx =$$
$$-w \cdot (\partial c/\partial x)\cdot S \cdot dx + D \cdot (\partial^2 c/\partial x^2)\cdot \varepsilon \cdot S \cdot dx.$$

Ją pertvarkę gauname:

$$(\partial c/\partial \tau)\cdot \varepsilon + (\partial c_K/\partial \tau)\cdot (1-\varepsilon) + w\cdot(\partial c/\partial x) = D\cdot(\partial^2 c/\partial x^2)\cdot \varepsilon. \qquad (21.17)$$

Sluoksnio elementui užrašyta medžiagų balanso lygtis galioja tik tada, kai greitis visuose sluoksnio taškuose yra pastovus, kadangi buvo laikoma, kad vientisoji fazė juda pagal idealaus išstūmimo modelį. Realių adsorberių vientisosios fazės greitis dėl įvairių priežasčių (pvz., susidarius šuntuojantiesiems srautams ir kt.) atskiruose adsorberio aukščiuose gali būti skirtingas. Matematiniam aprašymui supaprastinti tariama, kad adsorbento sluoksnio tūrio elemente koncentracijos pasiskirstymo greitis visuose taškuose yra pastovus, o į medžiagų balanso lygtį įtraukiami papildomi dydžiai. Pvz., (21.17)

lygtyje vietoj molekulinės difuzijos koeficiento D įrašomas išilginio maišymosi koeficientas D_L:

$$\varepsilon \cdot (\partial c/\partial \tau) + (1-\varepsilon) \cdot (\partial c_K/\partial \tau) + w \cdot (\partial c/\partial x) = \varepsilon \cdot D_L \cdot \partial^2 c/\partial x^2 \ . \quad (21.18)$$

Kai adsorbato koncentracija kietojoje fazėje yra X, $kg/kg_{gryno\ adsorbento}$, (21.18) lygtis užrašoma taip:

$$\varepsilon \cdot (\partial c/\partial \tau) + \rho_{pil} \cdot (\partial X/\partial \tau) + w \cdot (\partial c/\partial x) = \varepsilon \cdot D_L \cdot \partial^2 c/\partial x^2 \ . \quad (21.19)$$

(21.19) lygtyje yra dvi nežinomos funkcijos $X(x, \tau)$ ir $c(x, \tau)$, todėl, norint gauti uždarą lygčių sistemą, medžiagų balansas papildomas kinetikos lygtimi (žr. 19 dalį)

$$(\rho_{pil}/f) \cdot (\partial X/\partial \tau) = k_v \cdot \left[c - c^*(X)\right]; \quad (21.20)$$

ir adsorbcijos izotermos lygtimi

$$X = f(c^*). \quad (21.21)$$

(20.19)...(20.21) lygčių sistemos bendras analitinis sprendinys dar negautas. Yra gauti tik supaprastintų dalinių atvejų sprendiniai, kuriuose neįvertinamas masės perdavimo pasipriešinimas (pusiausviroji adsorbcija), arba išilginis maišymasis.

21.1.4. Adsorbcijos kinetika

Pusiausvirosios adsorbcijos kinetika aprašoma izotermos (21.21) ir medžiagų balanso (21.19) lygtimis. Kai masės pernešimo greitį prilyginsime begalybei, kiekviename aparato taške fazės bus pusiausviros. Užrašysime šių lygčių sistemą, papildytą ribinėmis sąlygomis, laikydami, kad išilginio maišymosi nėra (t. y. $D_L = 0$):

$$\varepsilon \cdot (\partial c/\partial \tau) + \rho_{pil} \cdot (\partial X/\partial \tau) + w \cdot (\partial c/\partial x) = 0 \ ; \quad (21.22)$$

$$x = f(c); \quad (21.23)$$

$$\tau \geq 0, \quad x = 0, \quad c = c_0, \quad X = X_0 \ ; \quad (21.24)$$

$$\tau = 0, \quad 0 < x < x_0, \quad c = \varphi(x), \quad X = f(c^*); \quad (21.25)$$

$$\tau = 0, \quad x > x_0, \quad c = 0, \quad X = 0 \ . \quad (21.26)$$

Užrašytos sąlygos nuo (21.24) iki (21.26) reiškia, kad pradiniu laiko momentu ($\tau = 0$) į adsorbento sluoksnį ($x = 0$) įtekanti, arba vientisoji, fazė,

kurios koncentracija $c = c_0$, yra pusiausvira su kietąja faze, kurios koncentracija $X = X_0$. Tai reiškia, kad adsorbente, turinčiame liekamąjį kiekį adsorbato, pradiniu laiko momentu sluoksnyje, kurio aukštis $0 < x < x_0$, adsorbuotos medžiagos pasiskirstymas išreiškiamas funkcija $c = \varphi(x)$.

(21.25) sąlyga rodo, kad pradiniu laiko momentu sluoksnyje, kurio aukštis $0 < x < x_0$, yra tam tikras liekamasis kiekis adsorbato.

Išsprendus šią lygčių sistemą galima nustatyti pastovios koncentracijos taškų judėjimo greitį sluoksnyje. Tokiems taškams galima užrašyti lygtį

$$dc = (\partial c/\partial x)\cdot dx + (\partial c/\partial \tau)\cdot d\tau = 0. \qquad (21.27)$$

Ši lygybė analogiška tokiai lygybei:

$$(\partial c/\partial x)\cdot(dx/d\tau) + (\partial c/\partial \tau) = 0. \qquad (21.28)$$

Kadangi tarp koordinačių x ir τ yra tam tikra tarpusavio priklausomybė, o $c = const$, tai dydis $dx/d\tau = U$ parodo taško, kurio koncentracija c, judėjimo greitį sluoksnyje.

Iš (21.22), (21.23), (21.28) lygčių sudaroma lygtis greičiui U apskaičiuoti:

$$U = w/(\varepsilon + \rho_{pil}\cdot \partial X/\partial c); \qquad (21.29)$$

čia $\partial X/\partial c = f'(c)$ – izotermos funkcijos išvestinė taške, kuriame koncentracija c.

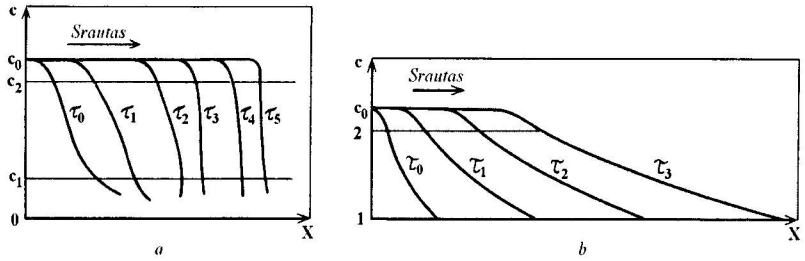
Naudojantis (21.29) priklausomybe galima analizuoti, kaip keičiasi koncentracijos profilis, srautui judant per sluoksnį. Pažymėtina, kad koncentracijų pasiskirstymas, pasiekus konkretų laiko momentą, bet kurioje iš fazių vadinamas sorbcijos frontu, arba sorbcijos banga. Jos kitimas laikui bėgant nagrinėjamas kaip sorbcijos fronto judėjimas arba persislinkimas.

Iškilosios izotermos atveju ($\partial^2 X/\partial c^2 < 0$), kai $c_2 > c_1$, iš (21.29) lygties galima nustatyti taškus, kuriuose mažesnės koncentracijos srautas judės greičiau ir dėl to pradinis profilis (sorbcijos frontas) $c = \varphi(x)$ pamažu susispaus iki be galo plono (pakopinio) profilio (21.3 pav., *a*).

Jeigu izoterma yra įgaubta ($\partial^2 X/\partial c^2 > 0$) ir $c_2 < c_1$, mažesnės koncentracijos taškai judės didesniu greičiu, todėl adsorbcijos frontas išsiplės (21.3 pav., *b*).

Pramoninėmis sąlygomis adsorbento sugerties greitis gana didelis, ir tai procesą priartina prie pusiausvyros, todėl aprašytoji koncentracijų profilių analizė, esant įvairioms adsorbcijos izotermoms, leidžia apytikriai spręsti apie statinių veiksnių įtaką adsorberių darbo efektyvumui. Iš atliktos analizės ma-

tyti, kad esant iškilajai izotermai, adsorbcijos sąlygos palankiausios, kadangi „peršokimas“, t. y. minimaliai leistina koncentracija, esant pakopiniam profiliui, už sluoksnio pasirodo tada, kada jis visiškai prisisotinęs, todėl procesui atlikti pakanka nedidelio būtino (minimalaus) adsorberio ilgio arba aukščio.



21.3 pav. Sorbcijos fronto judėjimo pobūdis adsorbento sluoksnio aukštyje, esant iškilosioms (*a*) ir įgaubtosioms (*b*) izotermoms

Įgaubtosios izotermos atveju adsorbcijos sąlygos mažiausiai pageidautinos, kadangi „peršokimo“ koncentracija už sluoksnio dėl didėjančio profilio plėtimosi gali pasirodyti gana greitai.

Nepusiausvirosios adsorbcijos kinetika aprašoma lygčių nuo (21.20) iki (21.22) sistema. Kinetikos lygties analitinio sprendimo forma priklauso nuo adsorbcijos izotermos aprašymo formos.

Jeigu izoterma yra iškila, tai kinetikos uždavinį proceso pradinėje stadijoje galima spręsti gana paprastai. Šiuo atveju slenkančio sorbcijos fronto formą veikia du pagrindiniai veiksniai: nukrypimas nuo sorbcijos pusiausvyros plečia frontą, o iškiloji izotermos forma – jį glaudžia. Kadangi šie veiksniai veikia prieštaringai, tai tam tikru atstumu nuo srauto įtekėjimo, sorbcijos frontas pradeda judėti pastoviu greičiu ir nekeičia savo formos – gaunamas stacionarus sorbcijos frontas.

Pakeitus momentinį atstumą pagal sluoksnio ilgį x į atstumą pagal koncentracijos profilio plotį z (21.4 pav.), (21.22) lygtį galima pakeisti lygtimi su paprastosiomis išvestinėmis.

Koncentraciją c arba X profilyje laisvai pasirenkamas taškas. Jeigu koordinačių pradžios slinkimo greitis U, o laisvai pasirinkto taško c arba X koordinatė x, tai naujos koordinatės vertė z bus apskaičiuojama pagal tokią lygtį:

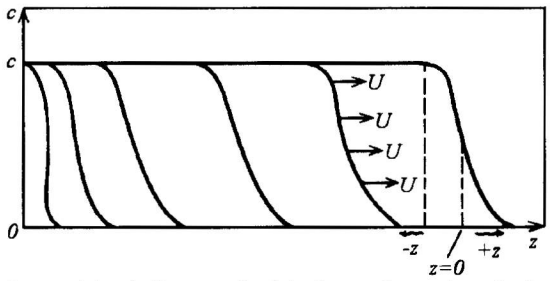
$$z = x - U \cdot \tau \,. \qquad (21.30)$$

Koncentracija šioje judančioje koordinačių sistemoje bus tik z funkcija, kadangi nesikeičiantis profilis slenka kartu su naująja koordinačių sistema.

Pakeitę kintamuosius, gauname tokią lygčių sistemą:

$$-U \cdot \varepsilon \cdot (dc/dz) - U \cdot \rho_{pil} \cdot (dX/dz) + w \cdot (dc/dz) = 0 ; \qquad (21.31)$$

$$-\rho_{pil} \cdot U \cdot (dX/dz) = K_{Vc} \cdot \left[c - c^*(X)\right]. \qquad (21.32)$$



21.4 pav. Adsorbcijos standartinio fronto formavimosi schema

Šios lygčių sistemos ribinės sąlygos būtų tokios:

$$\tau \to \infty , \quad z = -\infty , \quad c = c_0 , \quad X = X_0 ; \qquad (21.33)$$

$$z = +\infty , \quad c = 0 , \quad X = 0 . \qquad (21.34)$$

Suintegravus (21.31) lygtį, naudojant ribines sąlygas (21.33) bei (21.34), gaunama lygtis fronto slinkimo greičiui apskaičiuoti:

$$U = w \cdot c/\left(\varepsilon \cdot c + \rho_{pil} \cdot X\right) = w \cdot c_0/\left(\varepsilon \cdot c_0 + \rho_{pil} \cdot X_0\right). \qquad (21.35)$$

Iš jos gaunama tiesinė priklausomybė tarp koncentracijų judančioje fazėje ir adsorbente:

$$c/c_0 = X/X_0 . \qquad (21.36)$$

Kadangi judančioje koordinačių $c = \varphi(z)$ sistemoje z yra koncentracijos c funkcija, tai

$$z = \varphi^{-1}(c) = z(c); \qquad (21.37)$$

čia φ^{-1} yra φ funkcijos atvirkštinė funkcija.

Remiantis (21.30) priklausomybe, gaunama kinetikos lygčių sistema:

$$x = U \cdot \tau + z(c); \qquad (21.38)$$

$$x = U \cdot \tau + z(X). \qquad (21.39)$$

Funkcijos $z(c)$ ir $z(X)$ gaunamos integruojant (21.32) kinetikos lygtį, atsižvelgiant į (21.35) ir (21.36) lygtis:

$$z(X)=-\frac{w\cdot c_0\cdot\rho_{pil}}{(\varepsilon\cdot c_0+\rho_{pil}\cdot X_0)\cdot K_{Vc}}\cdot\int\frac{dX}{(c_0/X_0)\cdot X-c^*(X)}+c_1\,; \tag{21.40}$$

$$z(c)=-\frac{w\cdot X_0\cdot\rho_{pil}}{(\varepsilon\cdot c_0+\rho_{pil}\cdot X_0)\cdot K_{Vc}}\cdot\int\frac{dc}{c-c^*(X)}+c_1\,. \tag{21.41}$$

Integravimo konstanta c_1 apskaičiuojama pagal medžiagų balanso lygtį:

$$c_1=\frac{\varepsilon\cdot\int_0^{c_0}z_0(c)\cdot dc+\rho_{pil}\cdot\int_0^{X_0}z_0(X)\cdot dX}{\varepsilon\cdot c_0+\rho_{pil}\cdot X_0}\,; \tag{21.42}$$

čia $z_0(X)$ ir $z_0(c)$ – (21.40) ir (21.41) lygčių dešiniosios pusės pirmieji dėmenys.

Pagal (21.38)...(21.42) lygtis apskaičiuojama: fazių koncentracijos ir pagal jas nubraižomi jų profiliai; būtinas adsorbento sluoksnio ilgis arba aukštis; laikas, kai žinomas sluoksnio ilgis.

Teigiama, kad (21.38) ir(21.39) lygčių sistemos sprendinys sutampa su Šilovo lygties sprendiniu:

$$\tau=k_a\cdot L-\tau_0\,; \tag{21.43}$$

čia k_a – apsauginio veikimo koeficientas, s/m; L – adsorbento sluoksnio ilgis arba aukštis, m; τ_0 – apsauginio veikimo trukmės nuostoliai, s/m.

Izoterminės adsorbcijos kinetikos lygčių sistemos sprendinys galioja ne tik stacionariam frontui, judančiam pastoviu greičiu. Analitinis sprendinys galioja tik tiesės formos izotermai. Padarius atitinkamas pataisas, jį galima naudoti ir netiesinėms priklausomybėms, kurioms galioja lygtis

$$X^*/X^*(c_0)=(c/c_0)/[c/c_0+r\cdot(1-c/c_0)]; \tag{21.44}$$

čia r – pastovus dydis, vadinamas pasiskirstymo veiksniu.

Lengmiūro lygtimi aprašomos izotermos atveju pasiskirstymo veiksnys apskaičiuojamas pagal lygtį

$$r=1/(1+k\cdot c_0)\,. \tag{21.45}$$

Tiesės formos izotermai $r = 1$.

Kinetikos lygčių sistema, esant pastoviai pasiskirstymo veiksnio vertei, sprendžiama priklausomai nuo adsorbcijos sąlygų:

a) adsorbcija, kai adsorbentas proceso pradžioje yra švarus ($X_p = 0$):

$$\frac{c}{c_0} = \frac{I\cdot(n_{0c}r, n_{0c}, T)}{I\cdot(n_{0c}r, n_{0c}, T) + exp[n_{0c}\cdot(1-r)\cdot(1-T)]\cdot[1-I(n_{0c}, n_{0c}Tr)]}; \tag{21.46}$$

$$\frac{X}{X_0} = \frac{I\cdot(n_{0c}r, n_{0c}, T)}{I\cdot(n_{0c}r, n_{0c}, T) + exp[n_{0c}\cdot(1-r)\cdot(1-T)]\cdot[1-I(n_{0c}, n_{0c}Tr)]}; \tag{21.47}$$

čia $n_{0c} = K'_{Vc}\cdot x/w$ – bendras masės pernešimo vienetų skaičius adsorbento sluoksniui, kurio ilgis x; $T = w\cdot c_0\cdot[(\tau + x\cdot\varepsilon)/w]/\rho_{pil}\cdot X^*(c_0)\cdot x$ – bematis dydis: $[(\tau + x\cdot\varepsilon)/w]$,

$K'_{Vc} = 2\cdot K_{Vc}/(r+1)$, kai $0{,}2 < r < 1$;
$K'_{Vc} = K_{Vc}/(r+1)$, kai $r > 1$;
$K'_{Vc} = K_{Vc}$, kai $r = 1$.

Tūrinio masės perdavimo koeficientus K_{Vc} ir K'_{Vc} būtina perskaičiuoti, koreguojant (21.46) ir (21.47) lygtis, kurios visiškai galioja tik tiesės formos izotermoms ($r = 1$); funkcija $I(\alpha, \beta)$ sudaro eilę, sutampančią, esant didelėms α ir β vertėms. Funkcijos I verčių priklausomybės nuo parametrų α ir β pateikiamos lentelėse;

b) izoterminės desorbcijos atveju (21.44)...(21.47) lygtys užrašomos taip:

$$X^*/X^*{}_p = \frac{r\cdot c/c^*(X)}{1+(r-1)\cdot c/c^*(X_p)}; \tag{21.48}$$

$$r = 1 + k\cdot c^*(X_p); \tag{21.49}$$

$$\frac{c}{c^*(X_p)} = \frac{1-I(n_{0cr}, n_{0c}T)}{1-I(n_{0cr}, n_{0c}T) + exp[n_{0c}\cdot(1-r)\cdot(1-T)]\cdot I(n_{0c}, n_{0c}Tr)}; \tag{21.50}$$

$$\frac{X}{X_p} = \frac{I(n_{0c}T, n_{0c}r)}{1-I(n_{0cr}, n_{0c}T) + exp[n_{0c}\cdot(1-r)\cdot(1-T)]\cdot I(n_{0c}, n_{0c}Tr)}. \tag{21.51}$$

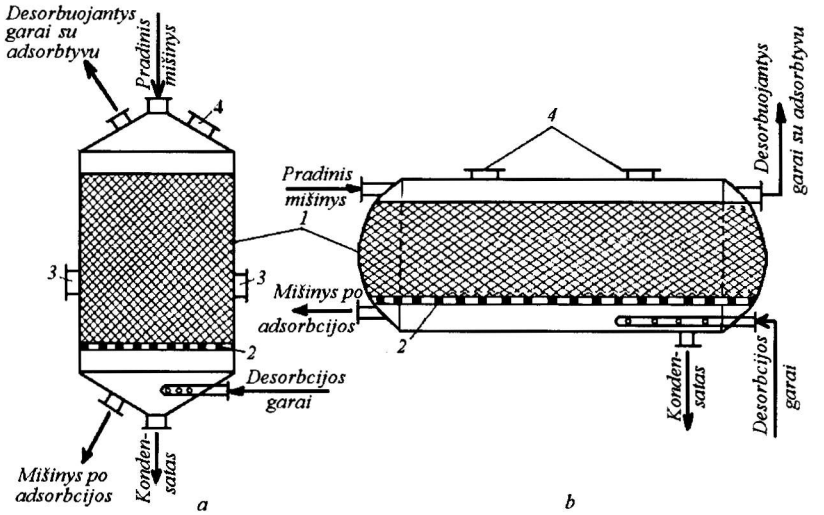
(21.44)...(21.51) lygtys naudojamos skaičiuoti koncentracijoms ir proceso trukmei arba adsorbento sluoksnio aukščiui (ilgiui) nustatyti, atliekant izoterminę adsorbciją (desorbciją), kurios izotermos aprašomos (21.44), (21.48) lygtimis.

21.2. Adsorberiai

21.2.1. Adsorberių konstrukcija ir veikimo principas

Adsorberiai su stacionariu adsorbento sluoksniu. Pramonėje dažniausiai naudojami vertikalieji ir horizontalieji adsorberiai su stacionariu adsorbento sluoksniu (21.5 pav.). Tai yra periodinio veikimo aparatai. Jie turi korpusą *1*, kuriame ant atraminio paskirstymo tinklelio *2* yra adsorbento sluoksnis. Pradinis dujų mišinys arba tirpalas per adsorbento sluoksnį teka iš viršaus žemyn. Desorbuojant adsorbtyvą vandens garais, jie tiekiami pro apatinį antgalį, o kondensatas išleidžiamas pro dugne įrengtą antgalį. Nekondensuoti garai kartu su desorbuota medžiaga išteka pro aparato dangtyje esantį antgalį. Adsorbentas pakraunamas ir iškraunamas pro latakus *4* ir *3*.

Vertikaliaisiais adsorberiais adsorbuojamos dujas, esant nedideliam arba vidutiniam gamybos našumui. Kai gamybos našumai ne mažesni kaip 30000 m^3/h perdirbamo mišinio, naudojami horizontalieji adsorberiai, kuriuose susidaro nedideli hidrauliniai pasipriešinimai.

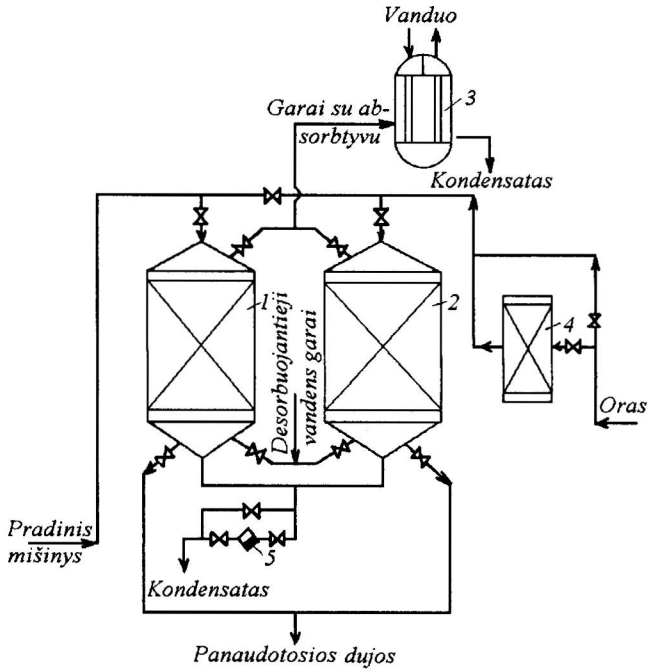


21.5 pav. Adsorberiai su stacionariu adsorbento sluoksniu:
a – vertikalusis, *b* – horizontalusis; *1* – korpusai, *2* – atraminės paskirstymo plokštelės, *3* – adsorbento iškrovimo kanalai, *4* – adsorbento pakrovimo kanalai

Tokius periodinius adsorberius su stacionariu adsorbento sluoksniu lygiagrečiai sujungus į grandinę, gaunamas nuolatinio veikimo adsorbcijos įren-

ginys. Adsorberių skaičius grandinėje apskaičiuojamas pagal adsorbcijos-desorbcijos ciklo ilgį. Rekuperacinio įrenginio schema pavaizduota 21.6 pav.

Pradinis dujų mišinys tiekiamas į aktyvintosiomis anglimis užpildytą *1* adsorberį. Prisisotinus adsorbento sluoksniui pirmajame absorberyje *1*, jis perjungiamas desorbcijai, o adsorbuojamų dujų srautas leidžiamas į adsorberį *2*. Adsorbentas regeneruojamas, tiekiant į adsorberio apačią sočiuosius vandens garus. Vandens garai adsorbato garus išneša į kondensatorių *3*. Garų mišinio kondensatas iš kondensatoriaus *3* tiekiamas perskirti. Adsorbentas džiovinamas karštu oru, tiekiamu per kaloriferį *4*, o aušinamas per kaloriferio apvedamąją liniją tiekiamu atmosferos oru.



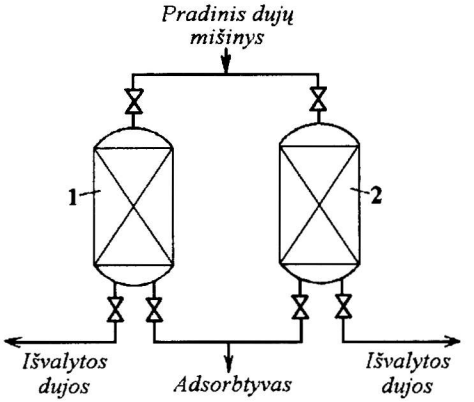
21.6 pav. Rekuperacinio adsorbcijos įrenginio schema: *1, 2* – adsorberiai, *3* – vandens garų ir desorbuojančiosios medžiagos garų kondensatorius, *4* – kaloriferis, *5* – kondensato išleidimo sklendė

Adsorbcijos įrenginio darbo ciklą gali sudaryti keturios stadijos: adsorbcija, desorbcija, džiovinimas, aušinimas, kai kada trys – adsorbcija, desorbcija, džiovinimas arba aušinimas, taip pat dvi stadijos – adsorbcija, desorbcija. Dviejų darbo stadijų režimu veikiantys adsorbcijos įrenginiai vadinami nešil-

domais trumpojo ciklo adsorbcijos įrenginiais. Jie naudojami dujoms valyti ir perskirti (21.7 pav.).

Dujų mišinys nedideliu slėgiu tiekiamas į adsorberį *1*, kuriame keletą minučių vienas iš komponentų yra adsorbuojamas. Po to, sudarius vakuumą, adsorbuotas komponentas desorbuojamas ir išleidžiamas, tuo metu adsorberyje *2* vyksta adsorbcijos stadija.

Trumpojo ciklo adsorbcijos įrenginiai yra kompaktiški, naudoja mažai energijos, kadangi desorbcijos stadijoje nereikia tiekti šilumos. Tačiau tokie įrenginiai ribotai naudojami apdorojant sistemas, kurių adsorbcijos pusiausvyra aprašoma nuožulniomis adsorbcijos izotermomis.



21.7 pav. Nešildomo trumpojo ciklo adsorbcijos įrenginio schema: *1*, *2* – adsorberiai

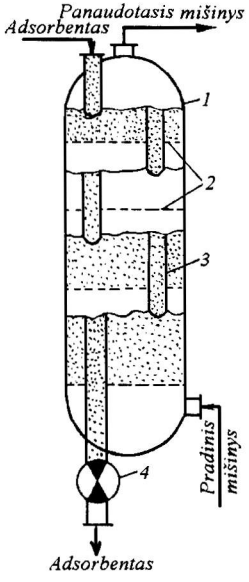
Adsorberiai su pseudoverdančiuoju ir judančiuoju adsorbento sluoksniu. Atskiro adsorberio, įjungto į adsorbcijos įrenginį, darbo periodiškumas padaro adsorbcijos įrenginius (išskyrus trumpųjų darbo ciklų įrenginius) griozdiškus ir tokiuose įrenginiuose procesas yra sunkiai automatizuojamas. Tokių trūkumų neturi nuolatinio veikimo adsorberiai su pseudoverdančiuoju ir judančiuoju adsorbento sluoksniu. Šių adsorberių trūkumas – nepakankamas pseudoverdantįjį sluoksnį sudarančių adsorbentų mechaninis stiprumas, nes pseudoverdančiajame ir judančiajame sluoksnyje jie yra intensyviai smulkinami.

Adsorberiai su pseudoverdančiuoju adsorbento sluoksniu išilginiam maišymuisi sumažinti pagal aukštį yra suskirstyti į sekcijas. Jų konstrukcija yra tokia pat kaip barbotažinių lėkštinių kolonų.

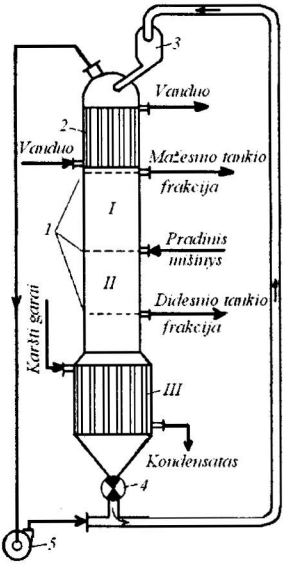
Daugelio pakopų adsorberį su pseudoverdančiuoju adsorbento sluoksniu (21.8 pav.) sudaro keletą cilindriniame korpuse *1* išdėstytų sekcijų. Sekcijos atskirtos viena nuo kitos paskirstymo tinkleliais *2*. Adsorbentas į aparato vir-

šutinę sekciją tiekiamas pro vamzdį adsorberio viršuje ir aparato viduje pro perpylimo vamzdžius *3* juda priepriešiais terpės (dujų, garų arba tirpalo) srautui, tiekiamam iš apačios ir išleidžiamam viršuje. Kietajai fazei išleisti adsorberio apačioje įrengta reguliavimo sklendė *4*.

Adsorberio su judančiuoju grūdinio adsorbento sluoksniu, skirto dujų mišiniams perskirti, schema pateikta 21.9 pav. Aparatą sudaro adsorbcijos zona *I* ir rektifikacijos zona *II*, kur tiekiamas dujų mišinys yra perskiriamas, bei desorbcijos zona *III*, kurioje regeneruojamas adsorbentas. Zonos atskirtos paskirstymo tinkleliais *1*. Adsorbentas nuolat juda aparate: pradžioje aušinamas šaldytuve *2*, paskui juda per adsorbcijos zoną *I*, kurioje jis pirmiausia sugeria sunkiuosius komponentus, prisodrinamas dujų mišinį lengvosios frakcijos, kuri išleidžiama iš šios zonos. Adsorbentui tekant per rektifikacijos zoną *II*, iš dalies sugertą lengvąją frakciją išstumia sunkiosios frakcijos garai, judantys iš desorbcijos zonos *III*. Karštas adsorbentas pneumatiniu transportu, naudojant dujopūtę *5*, nukreipiamas į bunkerį *3*, o iš jo vėl patenka į šaldytuvą.



21.8 pav. Daugelio pakopų adsorberis su pseudoverdančiuoju sluoksniu: *1* – korpusas, *2* – dujų, garų arba tirpalo skirstymo tinklas, *3* – adsorbento perpylimo vamzdis, *4* – reguliavimo sklendė



21.9 pav. Adsorberis su judančiuoju tankiu grūdiniu adsorbento sluoksniu: *I* – adsorbcijos zona, *II* – rektifikacijos zona, *III* – desorbcijos zona; *1* – dujų, garų arba tirpalo skirstymo tinklas, *2* – šaldytuvas, *3* – adsorbento tiekimo bunkeris, *4* – reguliavimo sklendė, *5* – dujopūtė

21.2.2. Adsorberių skaičiavimas

Skaičiuojant adsorberius periodinės adsorbcijos atveju, jeigu žinoma proceso trukmė, pagrindiniai skaičiuojamieji dydžiai yra aparato skersmuo ir sorbento sluoksnio aukštis, nuolatinės adsorbcijos atveju – skersmuo, aparato aukštis, sekcijų skaičius jame ir adsorbento sąnaudos.

Aparato skersmuo apskaičiuojamas pagal debito lygtį, o reikalingas srauto greitis nustatomas (parenkamas iš žinynų) priklausomai nuo proceso organizavimo būdo.

Adsorberiai su stacionariu adsorbento sluoksniu. Adsorbuojant dujas, leistinas fiktyvus srauto greitis w_0 (t. y. dujų greitis laisvame adsorberio skerspjūvyje) gali būti apskaičiuotas pagal tokią lygtį:

$$w_0 = \left(0{,}016 \cdot r \cdot \rho_{pil} \cdot d_{ekv} \cdot g / \rho_d\right)^{0{,}5}; \qquad (21.52)$$

čia d_{ekv} – ekvivalentinis adsorbento granulių skersmuo, m; ρ_d – dujų tankis, kg/m^3.

Dujų greitis adsorberiuose paprastai būna ne didesnis kaip 0,3 m/s. Adsorbento sluoksnio aukštis apskaičiuojamas pagal (21.38); (21.39); (21.46); (21.47) lygtis, atsižvelgiant į jų naudojimo apribojimus.

Nuolatinio veikimo adsorberiai su pseudoverdančiuoju adsorbento sluoksniu. Fiktyvus greitis apskaičiuojamas kaip sluoksnio, kurio poringumas nuo 0,5 iki 0,65, pseudovirimo greitis.

Minimalios adsorbento sąnaudos vienos sekcijos aparate apskaičiuojamos pagal medžiagų balanso lygtį

$$G_{a\,min} \cdot \left[X^*\left(c_g\right) - X_p\right] = V \cdot \left(c_0 - c_g\right); \qquad (21.53)$$

čia $G_{a\,min}$ – adsorbento sąnaudos, kg/s; V – vientisosios fazės (terpės) tūrio debitas, m^3/s.

Realios adsorbento sąnaudos 1,1...1,3 karto didesnės už minimalias.

Minimalios adsorbento sąnaudos daugelio sekcijų adsorberyje apskaičiuojamos pagal lygtį:

$$G_{a\,min} = V \cdot \left(c_0 - c_g\right) / \left[X^*\left(c_g\right) - X_p\right]. \qquad (21.53a)$$

Adsorbento sluoksnio aukštis vienos sekcijos adsorberyje apskaičiuojamas pagal pagrindinę masės perdavimo lygtį, laikant, kad kietosios fazės judėjimas aprašomas idealaus sumaišymo, o vientisosios fazės – idealaus išstūmimo modeliu:

$$-V \cdot dc = K_{Vc} \cdot \left[c - c^*\left(X_g\right)\right] \cdot S \cdot dH. \qquad (21.54)$$

Iš (21.54) priklausomybės gaunama pseudoverdančiojo sluoksnio aukštį H ir koncentracijos kitimą sraute aprašanti lygtis:

$$H = \left(\frac{w}{K_{Vc}}\right) \cdot ln \frac{c_0 - c^*(X_g)}{c_g - c^*(X_g)}. \qquad (21.55)$$

Daugelio sekcijų adsorberių su pseudoverdančiuoju sluoksniu aukštis taip pat apskaičiuojamas pagal pagrindinę masės perdavimo lygtį:

$$H = (w/K_{Vc}) \cdot (c_0 - c_g) / \Delta c_{vid}. \qquad (21.55a)$$

Skaičiuojant nuolatinio veikimo adsorberius su judančiu grūdinės įkrovos sluoksniu, fiktyvus dujų srauto greitis imamas truputį mažesnis už tą greitį, kuris adsorbento grūdelius pakelia į pseudovirimo būseną (vadinamąjį kritinį, arba pseudovirimo pradžios, greitį). Adsorbento sąnaudos ir kontaktinės zonos aukštis apskaičiuojami pagal medžiagų balansą ir masės perdavimo lygtį, taikant kitų masės mainų procesų, pvz., absorbcijos, kolonų skaičiavimo metodikas (16 dalis).

21.3. Desorbcija

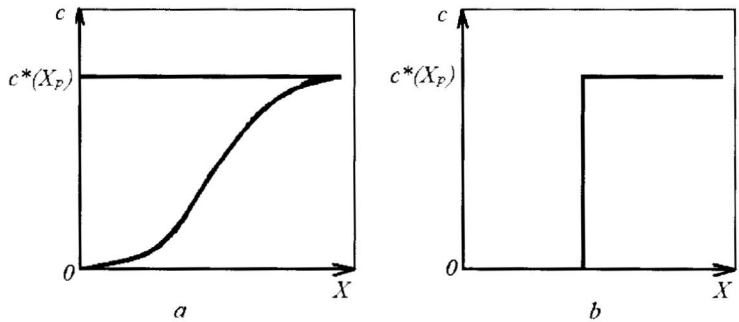
Kaip buvo minėta anksčiau, adsorbcijai atvirkščias procesas desorbcija, kai iš adsorbento pašalinamas adsorbatas, didesniu laipsniu ir didesniu greičiu vyksta, esant aukštesnei temperatūrai ir mažesniam slėgiui.

Esant iškilajai adsorbcijos izotermai, daugiausia medžiagos desorbuojama pradinėje proceso stadijoje, po to desorbcijos greitis gerokai sumažėja. Apie tai galima spręsti ir iš (21.29) lygties pagal kurią, srauto taškų, kuriuose koncentracija dujose $\left[c^*(X_p)\right]$ yra didžiausia, greitis yra didžiausias, o taškų, kuriuose koncentracija mažesnė, – mažesnis (21.10 pav., *a*). Kai izoterma įlinkusi, desorbuojamoji medžiaga į desorbuojančiojo komponento srautą atiduodama intensyviau, kas taip pat aiškinama izotermos tipo įtaka koncentracijos taškų judėjimo desorbcijos metu greičiui (21.11 pav., *b*).

Adsorbento regeneracijos arba desorbcijos metodus galima skirstyti į žemos temperatūros šiluminę, aukštos temperatūros šiluminę, cheminę ir išstūmimo regeneracijas bei regeneraciją sumažintame slėgyje.

Žemos temperatūros šiluminė adsorbento regeneracija atliekama tiesiogiai į jo sluoksnį tiekiant 100...400 °C temperatūros sočiuosius vandens garus arba dujas.

Dalis desorbcijai tiekiamų garų sunaudojama adsorbentams ir aparatams šildyti, adsorbcijos ir neigiamai absorbento drėkinimo šilumai kompensuoti. Kita, nesusikondensavusi, garų dalis išneša iš aparato desorbuotą medžiagą. Vandens garais dažniausiai regeneruojamos aktyvintosios anglys. Silikageliai, aliumogeliai ir ceolitai regeneruojami prapučiant pro juos aukštesnės temperatūros dujas.



21.10 pav. Koncentracijų sraute profiliai, vykstant desorbcijai: *a* – esant iškiloms, *b* – esant įgaubtoms adsorbcijos izotermoms

Regeneravimo temperatūros parenkamos pagal adsorbato ir adsorbento ryšio energiją, reikalingą pilnutinei desorbcijai, adsorbento terminį atsparumą ir regeneracijos trukmę. Kuo didesnė adsorbato ir adsorbento molekulių ryšio energija ir kuo didesniu laipsniu reikia desorbuoti, tuo aukštesnė turi būti regeneracijos temperatūra. Netikslinga regeneruoti esant temperatūroms, žemesnėms už ribinę, t. y. tokią, kuriai esant vakuume pusė adsorbato pasišalina per 10 min.

Jeigu regeneruojant žemoje temperatūroje negalima desorbuoti viso adsorbato, kaip, pavyzdžiui, būna apdorojant vandeniui valyti naudotas aktyvintąsias anglis, regeneruojama esant aukštai temperatūrai. Šios regeneracijos esmė – adsorbento apdorojimas įvairiomis dujomis, pvz., CO_2, temperatūrose, aukštesnėse už 400 °C. Regeneracijos metu, esant aukštoms temperatūroms, adsorbatas suskyla, o jo produktai pašalinami. Tokios regeneracijos sąlygomis iš dalies keičiasi ir adsorbento struktūra.

Chemiškai regeneruojama adsorbentus apdorojant skystaisiais arba dujiniais reagentais temperatūrose, žemesnėse kaip 100 °C. Kaip reagentai naudojamos rūgštys, šarmai, įvairūs oksidatoriai.

Išstumiamosios desorbcijos atveju adsorbentas apdorojamas tirpikliu, kurį geriau adsorbuoja adsorbentas negu adsorbuotoji medžiaga. Todėl toks tirpiklis lengviau išstumia ir išplauna absorbuotąją medžiagą.

Jeigu adsorbcijos izoterma nestati, galima regeneruoti netiekiant šilumos, o sumažinant slėgį aparate. Dėl to padidėja proceso varos jėga. Desorbcijos procesai, panašiai kaip ir adsorbcijos, vykdomi stacionariame, pseudoverdančiajame, judančiajame sluoksnyje. Skaičiuojant desorbcijos procesą, nustatoma periodinio proceso trukmė ir desorbuojančiojo agento debitas.

Taikant labiausiai paplitusius desorbcijos metodus, adsorbento sluoksnis įkaitinamas iki reikalingos temperatūros, o paskui prapučiamas beveik pastovios temperatūros dujomis arba garais. Izoterminės desorbcijos nejudančiaja-

me sluoksnyje koncentracijų profiliui ir proceso trukmei apskaičiuoti naudojamos (21.50) ir (21.51) lygtys. Sudėtingesniais atvejais naudojami eksperimentiniai duomenys.

21.4. Jonų mainai

Jonų mainai – tai adsorbcijos procesas, kurio metu kietasis kūnas, vadinamas jonitu, absorbuoja iš tirpalų vienus jonus ir grąžina į tirpalą ekvivalentinį kiekį to paties krūvio kitų jonų. Jonitai, gebantys pasikeisti su tirpalu katijonais, vadinami katijonitais, o gebantys pasikeisti anijonais, – anijonitais. Todėl jonų mainus galima nagrinėti kaip heterogeninę reakciją, užrašomą tokiomis lygtimis:

a) katijonų mainai:

$$HR + Na^{+} \leftrightarrow H^{+} + NaR\,; \qquad (21.56)$$

b) anijonų mainai:

$$2RCl + SO_4^{-2} \leftrightarrow 2Cl^{-} + R_2SO_4\,. \qquad (21.57)$$

Katijonitai ir anijonitai vadinami bendru sorbentų vardu. Sorbentai gali būti mineraliniai, organiniai arba sintetiniai. Tarpinę padėtį tarp anijonitų ir katijonitų užima amfolitai, kurie gali pakeisti katijonines ir anijonines grupes priklausomai nuo proceso atlikimo sąlygų. Todėl jie gali būti naudojami kaip anijonitai ir kaip katijonitai.

Priklausomai nuo jonizacijos laipsnio tirpale katijonitai skirstomi į stipriai rūgščius ir silpnai rūgščius, o anijonitai – į stipriai bazinius ir silpnai bazinius.

Pagal poringumo laipsnį jonitus galima skirstyti į gelius (mikroporinė struktūra) ir makroporinės struktūros jonitus. Tokie jonitai turi labiau išplėtotą struktūrą negu geliai, todėl paspartėja medžiagos pernešimas granulių viduje.

Jonitai, susiliečiantys su elektrolitų tirpalais, adsorbuoja iš tirpalų vienus jonus ir grąžina į tirpalą ekvivalentinį kiekį kitų to paties krūvio ženklo jonų, pvz., pagal (21.56) lygtį Na^{+} jonai yra pakeičiami H^{+} jonais, o pagal (21.57) lygtį SO_4^{2-} jonai pakeičiami Cl^{-} jonais. Anijonitai vadinami pagal jonus, kurių jie yra prisotinti: *H*–anijonitai; *Na*–anijonitai; *Ca*–anijonitai ir kt.; katijonitai atitinkamai vadinami *OH*–katijonitais; *Cl*–katijonitais ir t. t. Aktyviųjų grupių yra visame jonito tūryje. Trimatė jonito struktūra sudaro lyg kempinę, kurios porose, jam brinkstant, būna tirpiklis ir keičiami jonai. Mainuose dalyvaujantys tirpalo jonai turi difunduoti į matricą ir apsikeisti su jos jonais vietomis.

Kinetinės jonitų savybės ir jų mainų talpa taip pat priklauso nuo jų struktūros. Nuo angliavandenilių grandinių struktūros priklauso jonitų brinkimas. Galima pasiekti tokią angliavandenilių struktūrą, kada į jonito struktūros elementą dėl savo dydžio negali difunduoti tirpalo jonai. Tokiu atveju jonų mainai vyksta tik jonitų dalelių paviršiuje. Jonitų struktūra su tirpalų fiksuotais

jonais sudaro kietą netirpų polinomą, kurio krūvis kompensuojamas priešingo ženklo keičiamų jonų krūviais.

Katijonituose fiksuoti jonai turi neigiamąjį krūvį, anijonituose – teigiamąjį.

Stipriai rūgštūs katijonitai jonais gali keistis šarminėje, neutralioje ir rūgščioje aplinkoje. Stipriai rūgščiuose komponentuose fiksuoti jonai būna SO_3^{2-} grupės.

Silpnai rūgštūs katijonitai katijonais gali keistis tik tada, kai $pH \geq 7$. Fiksuoti jonai juose yra įvairios silpnai disocijuojančios grupės, pvz., $-COO^-$.

Stipriai šarminiai anijonitai jonų mainuose gali dalyvauti plačiame pH kitimo intervale. Šiuose anijonituose fiksuoti yra N^+ grupės jonai.

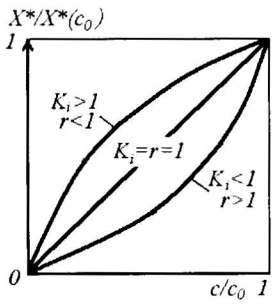
Silpnai šarminiai anijonitai anijonais geba keistis tik tada, kai $pH < 7$. Jiems priskiriami anijonitai su pirminėmis, antrinėmis ir tretinėmis amino grupėmis:

$$-NH_3^+,\ =NH_2^+,\ \equiv NH^+.$$

Kai kurie jonitai tuo pačiu metu turi stipriai ir silpnai disocijuojančias grupes.

Iš dervų gautiems jonitams būdinga didelė jonų mainų talpa, cheminis atsparumas ir mechaninis stiprumas. Keičiant aktyvių (fiksuotų) gupių sudėtį ir dervų struktūrą, galima gauti įvairių savybių jonitus.

Jonų mainų pusiausvyra. Sorbcinė jonitų geba nusakoma pilnutine tūrine jonitų mainų talpa, darbine (dinamine) ir pusiausvirąja arba statine tūrine talpa. Pilnutinė tūrinė jonitų mainų talpa lygi bendram jonitinių grupių skaičiui, tenkančiam jonito masės arba tūrio vienetui, *g*-ekv/kg arba *g*-ekv/m^3, ir reiškia jonitų ribinę sorbcinę gebą. Darbinė jonitų mainų talpa parodo adsorbuoto jono vidutinę koncentraciją visame jonito tūryje (stacionariame jo sluoksnyje), kol dar nepasiekta jonų mainų proceso pusiausvyra.



21.11 pav. Jonų mainų izotermos

Kada jonų mainų grįžtamoji reakcija nevyksta, pusiausviroji koncentracija jonite būna mažesnė už pilnutinę tūrinę jonitų mainų talpą. Pusiausvirajai koncentracijai įtakos turi visi veiksniai, veikiantys jonų mainų reakcijos cheminę pusiausvyrą, įskaitant pH ir temperatūrą.

Kontaktuojančių fazių pusiausvirosios koncentracijos jonų mainų procesuose, kaip ir adsorbcijos procesuose, apskaičiuojamos izotermų, kurios pateiktos 21.11 paveiksle, lygtimis. Dažniausiai izotermos lygčiai nustatyti remiasi veikiančių masių dėsniu. Katijonų mainų reakcijos

$$z_2 R_{z_1} Me_1^{z_1} + z_1 Me_2^{z_2^+} \leftrightarrow z_1 R_{z_2} Me_2^{z_2} + z_2 Me_1^{z_1^+},$$

izotermos lygtis užrašoma taip:

$$X_1^{1/z_1} / X_2^{1/z_2} = K_i \cdot c_1^{1/z_1} \cdot c_2^{1/z_2}; \qquad (21.58)$$

čia K_i – pusiausvyros konstanta; z_1 ir z_2 – stechiometriniai koeficientai; X_1 ir X_2 – katijonų Me_1 ir Me_2 koncentracijos jonite, kg/kg; c_1 ir c_2 – katijonų Me_1 ir Me_2 koncentracijos tirpale, kg/m^3.

Kadangi užrašytoje lygtyje yra trys nepriklausomi kintamieji, tai, norint gauti izotermos lygtis $X_1^* = f(c_1)$ arba $X_2^* = f(c_2)$, reikia įtraukti dvi medžiagų balanso lygtis:

$$X_1 + X_2 = X_0, \quad c_1 + c_2 = c_0;$$

čia X_0 – jonito pilnutinė tūrinė jonų mainų talpa, kg/kg; c_0 – suminė katijonų koncentracija tirpale, kg/m^3.

Lygių jonų krūvių mainų atveju, kai $r = 1/K_i$ izotermos lygtis yra tokios pat formos kaip (21.44) lygtis. Jonų mainų izotermos forma, remiantis (21.44) lygtimi, priklauso nuo pusiausvyros konstantos dydžio.

Jonų mainų kinetika. Anksčiau pateikta adsorbcijos stacionariame sorbento sluoksnyje kinetika taikoma ir jonų mainams. Kaip ir adsorbcijos atveju, koncentracijos kontaktuojančiose fazėse, sluoksnio storis arba proceso trukmė apskaičiuojami sprendžiant medžiagų balanso (21.19), kinetikos (21.20) ir izotermos (21.56) lygčių sistemą.

Jonų mainų stacionariajame adsorbento sluoksnyje kinetika gali būti aprašyta pagrindine masės perdavimo lygtimi (21.20). Jonų mainų kinetikos savitumas yra heterogeninės reakcijos, kaip atskiros stadijos, buvimas. Šios stadijos greitis didesnis už difuzinių proceso stadijų greitį. Be to, reikia atsižvelgti į tai, kad, vykstant jonų mainams, masės perdavimo greitis dažnai yra ribojamas vidinio masės pernešimo.

Kadangi adsorbcijos ir jonų mainų kinetikos matematiniai aprašymai sutampa, anksčiau nagrinėti pagrindiniai adsorberių skaičiavimo metodai gali būti taikomi ir jonų mainų aparatams skaičiuoti.

22 DALIS

TIRPIMAS IR EKSTRAHAVIMAS IŠ KIETŲJŲ KŪNŲ

Technologiniuose procesuose tirpimu suprantamas medžiagos „perėjimas" nuo dalelių paviršiaus į tirpalą. Šis procesas dažniausiai naudojamas tirpių ir inertinių medžiagų dalelių mišiniams perskirti. Laikoma, kad tirpiosios dalelės yra chemiškai nesusijusios su inertinių medžiagų dalelėmis ir šios neturi įtakos tirpių dalelių tirpimo kinetikai ir galutiniams proceso rezultatams. Paprastai fiziškai ištirpinta medžiaga gali būti iškristalizuojama.

Cheminis tirpimas yra heterogeninė reakcija, kurios produktai ištirpsta skystyje. Iš tirpalo iškristalizuoti pradinės medžiagos šiuo atveju negalima. Cheminio tirpimo sąlygomis gali susidaryti tirpimo kinetiką padarantys sudėtingesnę kietieji arba dujiniai reakcijos produktai. Tirpimo paviršiaus ekranizavimas kietaisiais reakcijos produktais gerokai sulėtina procesą, o dujų fazės susidarymas paspartina tirpimą iki tam tikros ribos, kurią viršijus dujų fazė pradeda veikti kaip ekranas. Tirpimo procesai dažniausiai vyksta greitai. Prie to prisideda tiesioginis judančio (maišomo) skysčio kontaktas su tirpstančios dalelės paviršiumi.

Ekstrahavimu vadinamas vieno arba kelių komponentų (ekstraktyvo) išgavimas iš kietosios medžiagos naudojant skysčius (ekstrahentus). Išgaunami komponentai yra ištirpę kietojo kūno porose arba kieti. Pirmuoju atveju kalbama apie ištirpusios medžiagos ekstrakciją, o antruoju – apie kietosios medžiagos ekstrakciją.

Ekstrakcijos metu kietosios medžiagos porose esanti ištirpusi medžiaga difunduoja į skysčio (ekstrahento) srautą, didėjant ištirpusios medžiagos (ekstraktyvo) koncentracijai ekstrahente ir mažėjant kietosios medžiagos kiekiui porose. Judant priešsroviams srautams, pasiekiamas didelis išgavimo laipsnis.

Kietosios medžiagos ekstrakcijos mechanizmas yra sudėtingesnis ir jungia tris stadijas: 1) ekstrahento prasiskverbimą į poringą kietojo kūno struktūrą; 2) tikslinio komponento tirpimą ekstrahente; 3) ekstrahente ištirpusio komponento difuziją į pagrindinę skysčio masę. Konkrečiomis sąlygomis kiekviena iš šių stadijų gali nusakyti viso proceso greitį, tačiau dažniausiai viso proceso greitį riboja trečioji stadija.

Kietosios medžiagos ekstrakcijos ir tirpimo kinetika skirtinga. Tirpdama medžiaga tiesiogiai liečiasi su judančiu skysčiu, todėl pasipriešinimas masės pernešimui nedidelis. Ekstrakcijos metu tikslinį komponentą turinčios kietojo kūno sritys pradžioje užima visą dalelės tūrį, o paskui sistemingai mažėja.

Išgaunamas komponentas, arba ekstraktyvas, tik ekstrakcijos pradžioje liečiasi su judančiu skysčiu, o toliau praranda kontaktą su juo. Medžiaga į poringojo kūno paviršių perneša molekulinės difuzijos poras užpildžiusiame nejudančiame skystyje būdu. Dėl šios priežasties ekstrakcija yra ne toks intensyvus procesas kaip tirpimas.

Ekstrakcijos iš kietųjų medžiagų ir jų tirpimo procesą galima suintensyvinti smulkinant į procesą tiekiamos kietosios medžiagos daleles. Tačiau šiuo atveju sudėtingesnės tampa pagalbinės smulkinimo (prieš ekstrakciją) ir tirpalo atskyrimo nuo kietosios fazės (po ekstrakcijos) operacijos. Didėjant kietosios medžiagos susmulkinimo laipsniui, didėja smulkinimui reikalingos energijos sąnaudos ir lėtėja po ekstrakcijos gautos suspensijos filtravimas arba nusodinimas.

22.1. Tirpimas

Daugeliu atvejų kietosios medžiagos skystyje tirpsta ribotai. Esant nurodytai tirpalo koncentracijai, vadinamai prisotinimo koncentracija, arba tirpumu, tarp kietojo kūno ir tirpalo nusistovi pusiausvyra. Prisotinimo koncentracija yra svarbiausias fizikinis cheminis ir technologinis parametras, kurio nustatymu prasideda kiekvieno tirpimo proceso tyrimas ir skaičiavimas, kadangi šis dydis parodo tirpiklio gebą priimti ištirpusią medžiagą. Be to, nuo šios koncentracijos labai priklauso tirpimo greitis.

Iš chemijos termodinamikos žinoma, kad pusiausvyra pasiekiama tada, kai medžiagos cheminis potencialas tirpale lygus kietos būsenos šios medžiagos cheminiam potencialui. Iš šios priklausomybės galima nustatyti prisotinimo koncentraciją. Tačiau praktiškai prisotinimo koncentracija priklauso nuo temperatūros; daugeliui sistemų ji yra nustatyta eksperimentiškai ir pateikta žinynuose.

Nagrinėjant tirpimo kinetiką, suformuluotas pagrindinis tirpimo kinetikos dėsnis: medžiagos srauto tankis nuo tirpimo paviršiaus ploto vieneto proporcingas tirpalo koncentraciniam neprisotinimui arba koncentracijos nukrypimui nuo prisotinimo:

$$g = dM/d\tau = \beta_c \cdot F \cdot (c^* - c); \qquad (22.1)$$

čia M – iki laiko momento τ ištirpusi medžiagos masė; F – tirpimo paviršiaus plotas; β_c – masės atidavimo koeficientas; c^* – prisotinimo koncentracija; c – tirpalo faktinė koncentracija.

(22.1) lygtis yra (19.1) lygties masės pernešimo bendruoju atveju, kai dalyvauja kietoji fazė, analogas.

Tirpstant skysčio sraute pakibusioms dalelėms, jų paviršiaus orientacija laisvai keičiasi, šiuo atveju dalelių dydis kinta, jų forma gali kisti arba likti pastovi. Ši priklausomybė užrašoma tokia lygtimi:

$$M = n \cdot a_V \cdot \rho_K \cdot l^3, \quad F = n \cdot a_F \cdot l^2; \tag{22.2}$$

čia n – dalelių skaičius; a_V, a_F – nuo dalelės formos priklausantys koeficientai; ρ_K – medžiagos dalelių tankis; l – momentinis dalelių dydis.

Į (22.1) lygtį įrašę (2.22) priklausomybes, gauname tokią lygtį:

$$-dl/d\tau = a \cdot \beta_C \cdot \left(c^* - c\right)/\rho_K; \tag{22.3}$$

čia $a = a_F/(3 \cdot a \cdot V)$.

Iš (22.3) lygties galima padaryti išvadą, kad dalelių dydžio mažėjimo, tirpstant kietosioms dalelėms, greitis yra proporcingas varos jėgai $\left(c^* - c\right)$. Kai varos jėga ir masės atidavimo koeficientas yra pastovūs, suintegravę (22.3) lygtį gauname:

$$l = l_0 - a \cdot \left[\left(c^* - c\right)/\rho_K\right] \cdot \beta_c \cdot \tau; \tag{22.4}$$

čia l_0 – dalelės dydis iki tirpimo.

Visiško dalelės ištirpimo trukmė τ apskaičiuojama pagal (22.4) lygtį, laikant, kad $l = 0$:

$$\tau = l_0 \cdot \rho_K / \left[a \cdot \left(c^* - c\right) \cdot \beta_c\right]. \tag{22.5}$$

Vykstant periodiniams arba nuolatiniams tirpimo procesams, tirpalo koncentracija nepertraukiamai kinta pagal proceso balanso lygtį. Periodinio tirpimo uždarame aparate balanso lygtis

$$M_0 - M = V \cdot \left(c - c_p\right); \tag{22.6}$$

čia M_0 – tirpstančios medžiagos masė prieš tirpinimą; V – tirpiklio tūris; c_p – tirpalo koncentracija tirpimo pradžioje.

Nuolatiniams pasroviniams procesams aprašyti taip pat tinka (22.6) lygtis, tik dydžiai M_0, M ir V yra masės ir tūrio debitai, kg/s arba m^3/s. Priešsrovių procesų balanso lygtis užrašoma taip:

$$M_0 - M = V \cdot \left(c_g - c\right); \tag{22.7}$$

čia c_g – iš aparato ištekančio tirpalo koncentracija.

Kartu išsprendus (22.3) ir (22.6) arba (22.7) lygtis, gaunami rezultatai, kurie yra teisingi tirpstant monodispersinėms dalelėms ir leidžia gauti funkcijas Φ_1 ir Φ_2 (o toliau jų pagrindu nustatyti dalelių visiško ištirpimo trukmę) tokiais atvejais:

- periodinio tirpinimo uždarame inde ir nuolatinio pasrovinio tirpimo atveju:

$$\Phi_1(1/a)-\Phi_1(\varphi/a)=\left(a^2\cdot\eta/\rho_K\right)\cdot a\cdot\beta_c\cdot\tau/l_0\ ; \qquad (22.8)$$

čia $\varphi=l/l_0$; $a=\left[\left(c^*-c_p\right)/\eta-1\right]^{1/3}$; $\eta=M_0/V$;

$$\Phi_1(x)=1/6\cdot ln\left[(1+x)^2/\left(1-x+x^2\right)\right]+\left(1/3^{1/2}\right)\cdot arctg\left[x\cdot 3^{1/3}/(2-x)\right]; \qquad (22.8a)$$

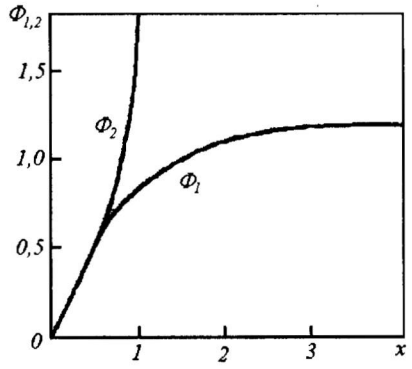
- priešsrovio tekėjimo atveju:

$$\Phi_2=(1/b)-\Phi_2(\varphi/b)=\left(b^2\cdot\eta/\rho_K\right)\cdot a\cdot\beta_c\cdot\tau/l_0\ ; \qquad (22.9)$$

čia $b=\left[\left(c^*-c_g\right)/\eta+1\right]^{1/3}$;

$$\Phi_2(x)=-1/6\cdot ln\left[(1+x)^2/\left(1+x+x^2\right)\right]+\left(1/3^{1/2}\right)\cdot arctg\left[x\cdot 3^{1/2}/(2+x)\right]. \qquad (22.9a)$$

Funkcijos Φ_1 ir Φ_2 pavaizduotos 22.1 pav. Naudojantis (22.8) ir (22.9) lygtimis, nesunku apskaičiuoti visiško ištirpimo trukmę, prieš tai padarius prielaidą, kad $\varphi=0$.



22.1 pav. Funkcijų Φ_1 ir Φ_2 grafinis vaizdas

$$a\cdot\left[\left(c^{*}-c_p\right)/\rho_K\right]\cdot\beta_c\cdot\tau/l_0=\Phi_1\cdot\left[a_c/(1-a_c)\right]^{1/3}/\left[a_c^{1/3}\cdot(1-a_c)^{2/3}\right];$$

čia $a_c=\left(c_g-c_p\right)/\left(c^{*}-c_p\right)$.

Srautams judant priešpriešiais,

$$a\cdot\left[\left(c^{*}-c_p\right)/\rho_K\right]\cdot\beta_c\cdot\tau/l_0=\Phi_2\cdot a_c^{-1/3}/a_c^{1/3};$$

čia $a_c=c_g/c^{*}$.

Pagal užrašytas lygtis apskaičiavus visiško ištirpimo trukmę matyti, kad priešsrovinio tirpimo trukmė tuo trumpesnė už pasrovinio tirpimo trukmę, kuo parametras a_c artimesnis vienetui. Kai $a_c=0{,}9$, trukmių santykis lygus 0,1.

Naudojantis (22.1) lygtimi ir (22.6) bei (22.7) balanso lygtimis, galima gauti matematinį masės pernešimo aprašymą, kai tirpinamas polidispersinis kietųjų dalelių mišinys, sudarytas iš daugiakomponenčių druskų sistemų (esant priešpriešiniams srautams):

$$dl_i/d\tau=a_i\cdot\beta_{ci}\cdot\left(c_i^{*}-c_i\right)/\beta_{Ki},\ \text{kai } i=1,2,..,n,$$

ir

$$\eta_i\cdot\left(1-l_i^3/l_{0i}^3\right)=c_{gi}-c_i;$$

čia $c_i^{*}=f\left(c_1,c_2,\ldots,c_n\right)$.

Pastaroji lygtis nusako i-ojo komponento prisotinimo koncentraciją nurodytos sudėties tirpale.

Visose tirpimo kinetikos lygtyse yra masės atidavimo koeficientas β_c, kuriam apskaičiuoti naudojamos apibendrintų kintamųjų lygtys:

- vykstant natūraliai konvekcijai:

$Nu'=0{,}6\cdot\left(Pr'\cdot Gr\right)^{1/4}$, kai $10^6<Pr'\cdot Gr<10^{10}$;

$Nu'=0{,}135\cdot\left(Pr'\cdot Gr\right)^{1/3}$, kai $Pr'\cdot Gr.>10^{10}$;

- skysčio srautui aptekant daleles:

$Nu'=A\cdot\left(Pr'\right)^{1/3}\cdot Re^{1/2}$, kai $10^2<Re<10^4$ (A kinta nuo 0,8 iki 0,95);

$Nu'=\left(Pr'\right)^{1/3}\cdot\left(0{,}51\cdot Re^{1/2}+0{,}0224\cdot Re^{0{,}78}\right)$, kai $2\cdot10^2<Re<2\cdot10^5$;

- kai dalelės yra pseudoverdančiosios būsenos,

$$Nu' = 0{,}3 \cdot (Pr' \cdot Ar)^{1/3};$$

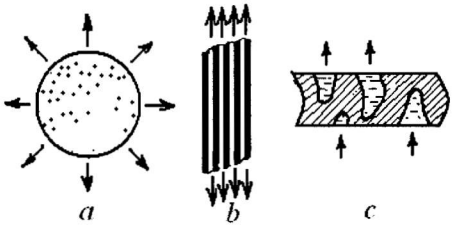
- intensyviai maišant aparate su maišikliu,

$$Nu' = 0{,}267 \cdot (Pr')^{0{,}25} \cdot \left(N^{1/3} \cdot l^{1/3}/\nu\right)^{0{,}75};$$

čia $Nu' = \beta_c \cdot l/D$ – difuzinis Nuselto kriterijus; $Re = w \cdot l/\nu$ – Reinoldso kriterijus; $Gr = [(\rho_s - \rho_T)/\rho_M] \cdot g \cdot l^3/\nu^3$ – Grashofo kriterijus; $Pr' = \nu/D$ – difuzinis Prantdlio kriterijus; $Ar = [(\rho_K - \rho_V)/\rho_V] \cdot g \cdot l^3/\nu^2$ – Archimedo kriterijus; D – difuzijos koeficientas; w – tirpstančią dalelę aptekančio srauto greitis; ρ_s – sočiojo tirpalo tankis; ρ_V – vidutinis visos tirpalo masės tankis; g – laisvai krintančių kūnų pagreitis; ρ_K – kietosios medžiagos tankis; ν – kinematinė klampa; N – energijos sąnaudos 1 kg suspensijos sumaišyti.

22.2. Ištirpusios medžiagos ekstrakcija

Kietojo kūno porose yra tikslinio komponento tirpalas. Sąveikaudamas su ekstrahentu, tikslinis komponentas per kietojo kūno poras difunduoja į pagrindinę skysčio masę. Porų skersmuo toks mažas, kad porose uždarytas skystis beveik nejuda. Todėl laikoma, kad ištirpusi medžiaga yra pernešama molekulinės difuzijos būdu.



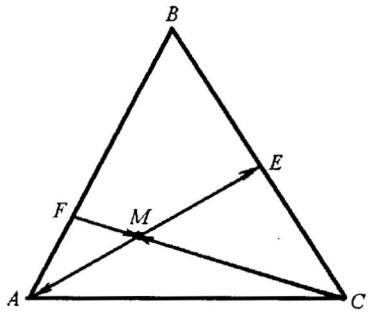
22.2 pav. Poringųjų kūnų struktūros variantai: *a* – izotropinis poringasis kūnas, *b* – anizotropinis reguliarios struktūros poringasis kūnas, *c* – anizotropinis nereguliarios struktūros poringasis kūnas. Rodyklės rodo difuzinio laidumo kryptį

Kietųjų dalelių struktūros būna labai įvairios. Iš jų reikia išskirti izotropines, kurios turi tą savybę, kad difuzinis dalelės laidumas visomis kryptimis būna vienodas (22.2 pav., *a*). Anizotropiniai kūnai gali būti reguliarios struktūros (22.2 pav., *b*). Tokie kūnai dažniausiai yra augalinės kilmės ir turi sistemą kapiliarų, kurių kryptimi difuzinis laidumas būna didžiausias. Nereguliarios struktūros anizotropiniams kūnams (22.2 pav., *c*) būdinga sudėtinga difuzinio laidumo

priklausomybė nuo porų. Medžiagos molekulinis pernešimas baigiasi, kai tikslinis komponentas pasiekia išorines poringojo kūno ribas; vėliau vyksta konvekcinis medžiagos pernešimas kietąjį kūną supančioje skysčio terpėje.

Nepertraukiamame ištirpusios medžiagos ekstrakcijos procese dalyvauja du srautai, sudaryti ne mažiau kaip iš trijų komponentų: pirmasis srautas – neištirpusi medžiaga A, kurios porose yra ekstraktyvo B ir ekstrahento C, ir antrasis srautas – ekstraktyvo B tirpalas ekstrahente C. Pirmasis srautas dažniausiai vadinamas apatiniu, o antrasis – viršutiniu.

Trijų komponentų sistemos sudėčių tarpusavio ryšys, kaip ir ekstrakcijos iš skysčių atveju, pavaizduojamas trikampėse diagramose arba stačiakampėje koordinačių sistemoje (22.3 pav.). Trikampio viršūnės A, B, C apibūdina atitinkamus komponentus, o kraštinės AB, BC ir AC – binarinius šių komponentų mišinius – $A + B$, $B + C$, $A + C$. Taškai trikampio viduje vaizduoja mišinius $A + B + C$. Kai taškas E atitinka sočiąją ekstrakto ($B + C$) būseną, esant tam tikrai temperatūrai, diagramos sritis AEC atitinka nesočiuosius komponentų B ir C tirpalus, kuriuose komponentas B gali pereiti iš kietosios fazės į skystąją. Susidariusių mišinių sudėtys ir kiekiai, taip pat santykiai tarp gautų ekstrakto ($B + C$) ir rafinato kiekių nustatomi pagal anksčiau nagrinėtą sverto taisyklę (žr. 18 dalį). Rafinatą sudaro neištirpęs komponentas A, kurio porose pasilieka tam tikras kiekis komponento B tirpalo ekstrahente C.



22.3 pav. Trijų komponentų diagrama (sistema *kietoji fazė-skystis*)

Pavyzdžiui, jeigu tirpalo sudėtį (22.3 pav.) atitinka taškas E, tai apatinio srauto sudėtį (taškas M) galima nustatyti atkarpą AE dalijant santykiu $\overline{AM}/\overline{ME} = G_T/G_A$ (čia G_T ir G_A – atitinkamai tirpalo ir neištirpusio komponento A kiekiai). Toliau procesas trikampėje fazinėje diagramoje vaizduojamas taip pat, kaip buvo aprašyta 18 dalyje. Pagal diagramą gali būti nustatomas teorinis pakopų skaičius.

Ištirpusios medžiagos ekstrakcijos kinetikos aiškinimas pradedamas nuo rutulio formos izotropinio poringojo kūno, kurio porose yra tikslinio produkto

tirpalo ir kurio koncentracija lygi pradinei tirpalo koncentracijai $c_{k.p}$. Ekstrakcijos metu koncentracija c mažėja tiek pagal koordinates, tiek laikui bėgant. Koncentracijos laukas porėtosios dalelės tūryje gali būti aprašytas difuzijos diferencialine lygtimi sferinėse koordinatėse:

$$\partial c_K / \partial \tau = k \cdot \left(\partial^2 c_K / \partial r^2\right) + \left(2/r\right) \cdot \left(\partial c_K / \partial r\right); \qquad (22.10)$$

čia c_K – koncentracija kietojoje fazėje, $kg_{ekstrahuojamos\ medžiagos}/m^3_{porų}$; τ – trukmė; k – masės laidžio koeficientas; r – momentinis spindulys $0 \le r \le R$ (R – poringojo kūno spindulys).

Į šią lygtį reikia įrašyti ribines sąlygas:

$$c_K = c_{k.p}, \text{ kai } \tau = 0;\ \partial c_K / \partial r = 0, \text{ kai } r = 0. \qquad (22.11)$$

Jei išlaikoma koncentracijos profilio simetriškumo sąlyga, tai

$$-k \cdot \rho_d \cdot \left(\partial c_K / \partial r\right)_{r=R} = \beta_c \cdot \left(c_p - c\right); \qquad (22.12)$$

čia β_c – masės atidavimo koeficientas; c_p – koncentracija kietosios dalelės paviršiuje, kai $r = R$.

(22.12) lygtis yra masės atidavimo nuo rutulio formos kūno į pagrindinę skysčio masę proceso matematinis aprašymas. Kiek medžiagos per laiko vienetą molekulinės difuzijos būdu patenka į fazių sąlyčio paviršių, tiek pagal masės atidavimo mechanizmą atiduodama į pagrindinį skysčio srautą.

Įrašius nemačius parametrus,

$$\varphi = r/R;\ \ Bi' = \beta_c \cdot R/\left(k \cdot \rho_d\right);\qquad Fo' = k_K \cdot \rho_d \cdot \tau / R^2.$$

(22.10) ir (22.12) lygtis pertvarkome taip:

$$\partial c_K / \partial Fo' = \left(\partial^2 c_K / \partial \varphi^2\right) + \left(2/\varphi\right) \cdot \partial c_K / \partial \varphi. \qquad (22.10a)$$

Iš čia

$$-\left(\partial c_K / \partial \varphi\right)_{\varphi=1} = Bi \cdot \left(c_p - c\right). \qquad (22.12a)$$

Kai $Bi' \to \infty$ (o praktiškai jau, kai $Bi' \ge 20$), tai $c_p \to c$, t. y. koncentracija dalelės paviršiuje lygi koncentracijai pagrindinėje skysčio masėje. Toks ekstrakcijos režimas vadinamas vidinės difuzijos režimu (žr. 19 dalį). Vidinės difuzijos režimo sąlygomis ekstrakcijos proceso intensyvumas būna didžiausias, nes pasipriešinimas išorinei difuzijai panaikintas.

Kai $Bi' << 1$, $\partial c_K / \partial r \to 0$, tai $c = 0$ ir turime vadinamąją išorinės difuzijos režimą. Šiam režimui būdinga tai, kad kiekvienu ekstrakcijos laiko momentu visame dalelės porų tūryje koncentracija pasiskirsto tolygiai. Didinant

masės atidavimo koeficientą (tai galima padaryti didinant dalelę aptekančio skysčio srauto greitį), galima pasiekti, kad ekstrakcijos procesas vyktų vidinės difuzijos režimu, kada jo intensyvumas didžiausias.

Norint išspręsti (22.10)...(22.12) lygčių sistemą, reikia į ją įtraukti medžiagų balanso lygtį, kuri nustato priklausomybę tarp koncentracijų X ir c, o (pasrovinių srautų atveju) sistemą padaro uždarą:

$$V_p \cdot (c_{K.p} - \bar{c}_K) = V \cdot (c - c_p); \qquad (22.13)$$

čia V_p – tirpalo užpildytas visų per laiko vienetą į aparatą patenkančių dalelių porų tūris; $c_{K.p}$ – pradinė kietosios medžiagos koncentracija kietųjų dalelių porose; $\bar{c}_K$ – vidutinė koncentracija dalelių tūryje nustatytu laiko momentu; V – per laiko vienetą į aparatą patenkantis ekstrahento tūris; c_p – pradinė ekstrahento koncentracija. Iš čia

$$\bar{c}_K = \left[1 \Big/ \left(\frac{4}{3} \cdot \pi \cdot R^3 \right) \right] \cdot \int_0^R c \cdot 4 \cdot \pi \cdot r^2 \cdot dr . \qquad (22.14)$$

Kai srautai teka prieš srovę,

$$V_p \cdot (c_{K.p} - \bar{c}_K) = V \cdot (c_g - c); \qquad (22.15)$$

čia c_g – ekstrahento galinė koncentracija.

Nagrinėtosios sistemos analitinis sprendimas:

$$\frac{c_{K.p} - \bar{c}_K}{c_{K.p} - c_0} = \frac{1}{1+\eta} - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{6 \cdot e^{-\mu_p^2 \cdot Fo'}}{\left(3 \cdot \eta - \mu_p^2 / Bi'\right)^2 + \mu_p^2 \cdot (1 - 1/Bi') + 9 \cdot \eta}, \qquad (22.16)$$

čia $Fo' = D \cdot \tau / R^2$; $\eta = V_p / V$; τ – kietųjų dalelių buvimo aparate trukmė, $\tau = L / W_K$ (čia W_K – kietosios fazės judėjimo greitis).

(22.16) lygtis teisinga esant pasroviniam ir priešsroviniam srautų judėjimui, tik, esant pasroviniam srautui, $\eta > 0$, $c_0 = c_p$, o esant priešsroviniam srautui, $\eta < 0$, $c_0 = c_g$; μ_p – būdingosios lygties šaknis.

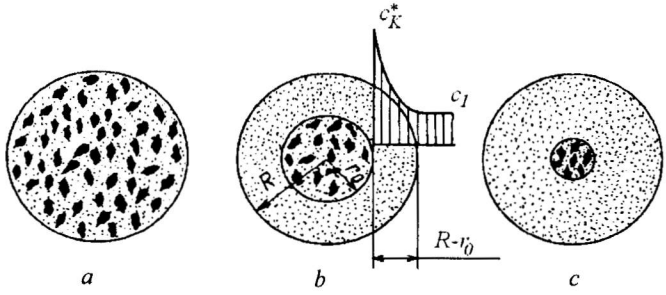
$$ctg\mu_p = (1/\mu_p) + \left[1/(3 \cdot \eta/\mu_p) - (\mu_p / Bi') \right].$$

Taigi naudojant kinetinę lygtį (22.16) galima ištirti, kaip pagal aparato ilgį keičiasi koncentracija $\bar{c}_K$ kietojo kūno porose, kai jame srautai juda pasroviui arba priešpriešiais ir parametrai η bei Bi' yra pastovūs, taip pat nusta-

tyti, aparato ilgį, kokio ilgio turi būti aparatas, kad būtų galima pasiekti reikiamą koncentracijos $\bar{c}_K$ vertę.

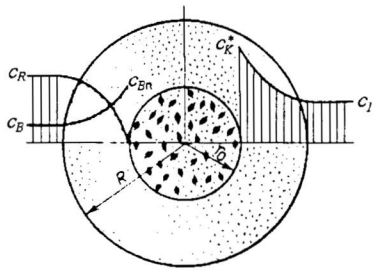
22.3. Kietosios medžiagos ekstrakcija

Kietųjų poringųjų dalelių tikslinis komponentas yra kietas. Galimi įvairūs tikslinio komponento pasiskirstymo dalelės tūryje variantai. Daugeliu atvejų išgaunamoji medžiaga būna tolygiai pasiskirsčiusi poringojo kūno tūryje. Ekstrahuojant išgaunamo komponento užimamos srities tūris mažėja (22.4 pav.). Nuo išgaunamo kietosios būsenos komponento atsilaisvinusią dalelės sritį užima ištirpęs tikslinis komponentas. Ilgėjant ekstrakcijos trukmei, šios srities tūris didėja.



22.4 pav. Poringosios dalelės struktūros kitimas (*a, b, c*) ekstrahuojant kietąją medžiagą

Panagrinėsime kietosios medžiagos ekstrakcijos kinetiką.



22.5 pav. Koncentracijų lauko kitimas ekstrahuojant kietus tikslinius komponentus

22.5 pav. pavaizduotas koncentracijos persiskirstymas ekstrahuojant kietąją medžiagą. Dešinėje dalyje parodytas koncentracijos pasiskirstymas medžiagai paprastai fiziškai tirpstant ekstrahente, o kairėje – chemiškai tirpstančio reagento ir reakcijos produktų (c_R ir c_B) pasiskirstymas. Matematiškai aprašysime masės mainus ekstrahuojant kietąją medžiagą, fiziniu būdu ištirpusią ekstrahente. Koncentracijų laukas, kai $r_0 \le r \le R$, aprašomas difuzijos diferencialine (22.10) lygtimi

$$\partial c_K / \partial \tau = k \cdot \rho_d \cdot \left[\left(\partial^2 c_K / \partial r^2 \right) + \left(2/r \right) \cdot \left(\partial c_K / \partial r \right) \right].$$

Ribinėmis sąlygomis

$$c_{K,r=r_0} = c_K^* , \quad c_{K,r=R} = c_1 . \tag{22.17}$$

Jeigu tariama, kad visa išgaunamoji medžiaga yra susikaupusi sferoje, kurios spindulys r_0, o jos pasiskirstymo tankis (išgaunamosios medžiagos masė dalelės tūrio vienete) $\eta_t = \rho_K \cdot \varepsilon$, tai masės turinys pasikeičia dėl medžiagos difuzijos nuo spindulio R sferos paviršiaus į pagrindinę skysčio masę:

$$d\left[(4/3)\cdot\pi\cdot r_0^3\cdot\eta_t\right]/d\tau = k\cdot\rho_d\cdot 4\cdot\pi\cdot R^2\cdot\left(\partial c_K/\partial r\right)_{r=R} . \tag{22.18}$$

Ši lygtis apibrėžia srities, kurioje kiekvienu laiko momentu τ medžiaga yra kieta, ribas $r = r_0$. Galima dar labiau supaprastinti nagrinėjamąją (22.10), (22.17), (22.18) lygčių sistemą. Reikia atkreipti dėmesį, kad kietosios medžiagos ekstrakcijos procesas yra lėtas, todėl kiekvienu laiko momentu srityje $r_0 \le r \le R$ „suspėja" nusistovėti stacionarus koncentracijos pasiskirstymas, tenkinantis tokią lygtį:

$$\partial^2 c_K/\partial r^2 + (2/r)\cdot\left(\partial c_K/\partial r\right) = 0 .$$

Šios lygties sprendinys, esant (22.17) ribinėms sąlygoms, užrašomas taip:

$$\left(c_K^* - c_K\right)/\left(c_K^* - c_1\right) = (1 - r_0/r)/(1 - r_0/R) . \tag{22.19}$$

Į (22.18) lygtį įrašius (22.19) lygtį ir šitaip gautą diferencialinę lygtį išsprendus, gaunamas galutinis rezultatas:

$$(1/6) - \left(\varphi_0^2/2\right) + \left(\varphi_0^3/3\right) = \left[\left(c_K^* - c_K\right)/\eta_p\right]\cdot\left(k\cdot\rho_d\cdot\tau/R^2\right); \tag{22.20}$$

čia $\varphi_0 = r_0/R$.

Kietojo kūno visiškosios ekstrakcijos trukmė apskaičiuojama pagal (22.20) lygtį, kai $\varphi_0 = 0$:

$$\tau = (1/6)\cdot\left[\eta_p/\left(c_K^* - c_K\right)\right]\cdot\left[R^2/(k\cdot\rho_d)\right]. \tag{22.20a}$$

Galima spręsti ir bendresnį pasrovinės ir priešsrovinės ekstrakcijos uždavinį. Tam tikslui vietoj prielaidos, kad $c_K = const$, reikia naudoti medžiagų balanso lygtis, kaip buvo daryta anksčiau, nagrinėjant masės mainų procesus. Teorinis tirpimo, arba ekstrakcijos kinetikos, aprašymas, derinamas su bandymais, gali būti inžinerinių skaičiavimų pagrindas. Kitas skaičiavimo metodas yra teorinių pusiausvyros pakopų skaičiaus nustatymas, kaip tai daroma ekstrahuojant iš skysčių. Panaudojus naudingumo koeficientą, įvertinantį priartėjimą prie pusiausvyros, galima apskaičiuoti būtiną pusiausvyros pakopų

skaičių. Suprantama, šis naudingumo koeficientas taip pat nusakomas fazių kontakto trukme, t. y. ta pačia tirpimo arba ekstrakcijos kinetika.

22.4. Ekstrakcijos ir tirpimo metodai

Chemijos technologijoje naudojami pagrindiniai ekstrakcijos ir tirpimo procesai skirstomi taip: 1) periodinis procesas; 2) pasrovinis ir priešsrovinis procesai; 3) procesas nejudančiajame sluoksnyje.

Periodinis procesas atliekamas aparatuose su maišikliais arba pneumatinio maišymo aparatuose. Pneumatinio maišymo agentą (orą), jei reikia, galima panaudoti oksidavimui. Intensyviai maišant, kietosios dalelės juda kintamu greičiu ir kintama kryptimi, tai atsilikdamos nuo jas apiplaunančio skysčio srauto, tai jį aplenkdamos. Tokiomis sąlygomis atsiranda laikui bėgant kintantis aptekėjimo greitis, sąlygojamas kietųjų dalelių inercijos. Esant tokiam inerciniam režimui, susidaro palankios sąlygos tirpimo ir ekstrakcijos procesą paspartinti, nors jo varos jėga, sistemai artėjant prie pusiausvyros, mažėja.

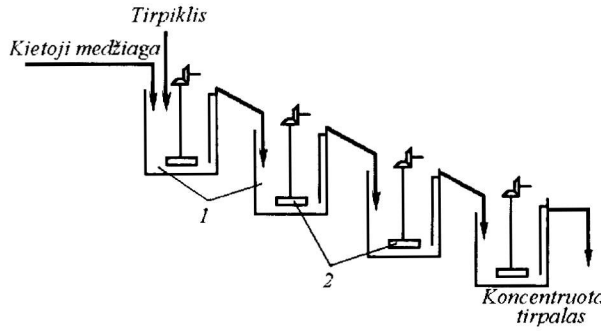
Silpnai maišant, kietosios dalelės skystyje būna pakibusios, t. y. gana ilgai juda paeiliui į viršų kylančiame ir besileidžiančiame skysčio srautuose. Tokiomis sąlygomis visas jų paviršius apiplaunamas skysčiu, bet aptekėjimo greitis šiuo atveju nusakomas dalelių sunkio jėga ir yra mažesnis už atitinkamus inercinio režimo greičius.

Pasrovinis ir priešsrovinis procesai atliekami nuolatinio veikimo aparatuose ir yra plačiai naudojami pramonėje. Tirpinant arba ekstrahuojant aparatuose su maišyklėmis į juos nepertraukiamai tiekiama ir iš jų šalinama kietoji medžiaga ir skystis. Tačiau tokio nuolatinio proceso intensyvumas mažėja, nes į aparatą tiekiama kietoji medžiaga reaguoja su tirpalu, kurio koncentracija dėl intensyvaus maišymo aparate artima soties koncentracijai. Tai sumažina ekstrakcijos proceso varos jėgą, o kartu ir greitį, palyginti su vidutiniu vienos operacijos greičiu periodinio proceso metu, kai analogiškos sąlygos susidaro tik baigiamojoje stadijoje. Be to, pavieniame aparate dalis kietosios medžiagos dalelių peršoka proceso zoną, todėl šių dalelių buvimo trukmė gali būti nepakankama dideliam ekstraktyvo išgavimo laipsniui pasiekti.

Todėl ekstrakcija ir tirpimas vyksta nuosekliai sujungtų aparatų su maišyklėmis, per kuriuos suspensija teka savitaka, kaskadoje. Tokioje schemoje (22.6 pav.) srautams judant pasroviui proceso varos jėga nuo pakopos į pakopą po truputį mažėja, tačiau ne tokiu laipsniu, kaip viename aparate su maišykle, kuriame su šviežiu tirpikliu maišosi proceso pabaigoje susidaręs koncentruotas tirpalas. Tokiose kaskadose, gautose sujungiant nuo 3 iki 6 aparatų, pasiekiamas gana didelis išgavimo laipsnis.

Kaskadose procesas vyksta efektyviau, kai srautai juda priešpriešiais. Kietosioms dalelėms judant prieš skysčio srautą, aparatų kaskados gale tiekiamas šviežias tirpiklis sąveikauja su dideliu laipsniu ekstrahuota medžiaga,

o kitame kaskados gale pradinė kietoji medžiaga apdorojama koncentruotu tirpalu. Taip pasiekiamas tolygesnis aparatų darbas: tame įrenginio gale, kur tiekiamas tirpiklis, pasiseka padidinti išgavimo laipsnį iš kietosios medžiagos porų gilumos, o priešingame gale – efektyviai panaudoti koncentruotą tirpalą ekstrakcijai nuo kietosios medžiagos gabaliukų (grūdelių) paviršiaus. Todėl padidėja tirpalo koncentracija, sumažėja tirpiklio sąnaudos ir padidėja aparatūros našumas.



22.6 pav. Nuosekliai sujungtų aparatų *1* su maišyklėmis *2* kaskada, srautams judant pasroviui

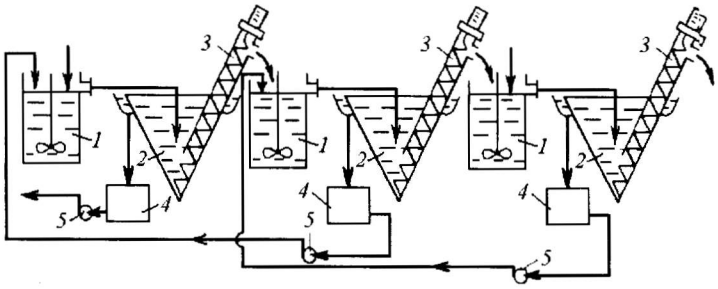
Priešsrautiniuose aparatuose smulkiosios dalelės sugaudomos skysčiu, judančiu kietosios fazės judėjimui priešinga kryptimi. Todėl du pasroviniai aparatai gali būti sujungti taip, kad veiktų priešsrautiniu principu.

Ekstrakcijos procesuose gautas tirpalas turi būti atskirtas nuo kieto netirpaus likučio (suspensijos), kuris šiam tikslui yra išplaunamas. Plaunama filtruose, centrifugose arba nusodintuvuose. Nuolatiniuose ekstrakcijos procesuose dažniausiai naudojamos priešsrautinės plovimo schemos, pvz., nuolatinio veikimo būgniniuose vakuuminiuose filtruose.

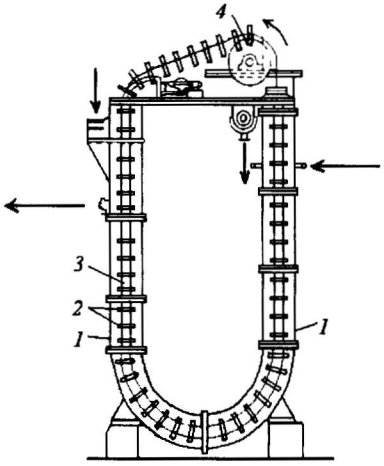
22.5. Ekstraktorių ir tirpinimo aparatų konstrukcija ir veikimo principas

22.7 pav. pavaizduota aparatų maišytuvo ir nusodintuvo sistema, susideda iš trijų modulių, kurių kiekvieną sudaro aparatas *1* su maišikliu, nusodintuvas *2* su sraigtiniu transporteriu *3* arba kita transportavimo priemone, rinktuvas *4* ir siurblys *5*.

Kietoji fazė transportuojama tirpalo judėjimui priešinga kryptimi; susidaro priešsroviniai srautai.



22.7 pav. Ekstraktorių maišytuvo ir nusodintuvo sistema, kurioje srautai juda prieš srovę: *1* – aparatai su maišikliais, *2* – nusodintuvai, *3* – sraigtiniai transporteriai, *4* – rinktuvai, *5* – siurbliai

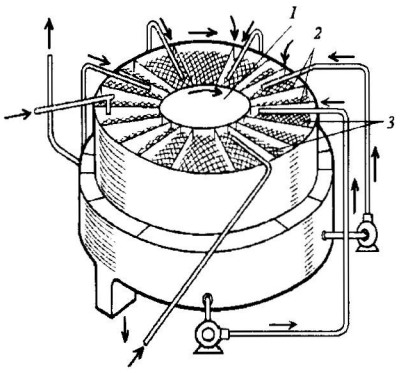


22.8 pav. Priešpriešinių srautų ekstraktorius: *1* – korpusas, *2* – rėmeliai, *3* – ritinėlių grandinė, *4* – varantysis velenas

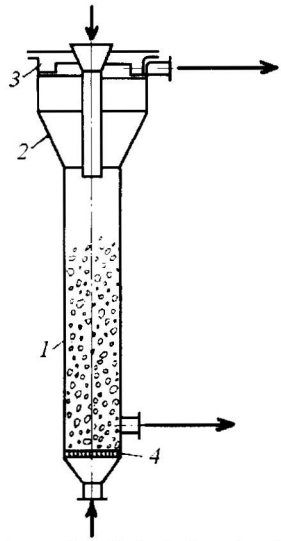
22.8 pav. pavaizduota priešsrovinio nuolatinio veikimo dviejų kolonų aparato schema. Jis įdėtas į stačiakampio formos skerspjūvio korpusą *1*, kurio viduje juda ritinėlių grandinės *3*. Prie grandinių pritvirtinti stačiakampiai rėmeliai *2*, aptempti tinkleliu, ant kurio išsidėsto kietoji medžiaga. Kai kurių konstrukcijų aparatų rėmeliai yra pakeisti perforuotais krepšeliais. Palyginus aparatus su priešpriešiniais srautais (22.7 ir 22.8 pav.), matyti, kad maišytuvo ir nusodintuvo aparate (22.7 pav.) dėl intensyvaus maišymo tirpimo (ekstrakcijos) greitis yra didesnis negu 22.8 pav. pavaizduotame aparate.

Prie nuolatinio veikimo priešpriešinių srautų aparatų priskiriami karuseliniai ekstraktoriai (22.9 pav.), kurių besisukantis rotorius *1* pertvaromis *2* suskirstytas į sekcijas *3*. Kiekviena sekcija užpildoma pradine dispersine medžiaga (žaliava) ir, vieną kartą apsisukusi, automatiškai iškraunama. Būtina rotoriaus sukimosi trukmė priklauso nuo to, kokį ekstrakcijos laipsnį reikia pasiekti. Rotoriaus sukimosi greitį galima reguliuoti plačiame intervale, kartu reguliuojant ekstrakcijos trukmę. Ekstrahentas tiekiamas į kiekvieną sekciją,

kurioje jis filtruojasi pro medžiagos sluoksnį ir renkasi tarpiniame inde. Iš tarpinio indo vėl tiekiamas priešsrautiniu principu kitai sekcijai laistyti.



22.9 pav. Karuselinis ekstraktorius:
1 – rotorius, *2* – pertvara, *3* – sekcija



22.10 pav. Vertikalusis ekstraktorius su žemyn slenkančiu medžiagos sluoksniu:
1 – kolona, *2* – separatorius,
3 – žiedo formos latakas,
4 – paskirstymo tinklelis

Perspektyviais laikomi vadinamieji sluoksniniai aparatai (22.10 pav.). Į cilindro formos koloną *1* pro apatinį atvamzdį nepertraukiamai tiekiamas skystis, kuris filtruojasi pro iš viršaus žemyn slenkantį kietosios medžiagos sluoksnį. Didelės koncentracijos tirpalas, įtekantis į kolonos išsiplečiančiąją dalį *2*, kuri vaidina separatoriaus vaidmenį, pro šoninį atvamzdį išteka iš aparato ir perdirbamas toliau. Kieta pradinė dispersinė medžiaga nepertraukiamai tiekiama pro pakrovimo vamzdį ir pašalinama aparato apatinėje dalyje.

Judantis kietosios medžiagos sluoksnis gali būti tankus arba pseudoverdančiosios būsenos. Aparato skiriamasis bruožas yra didelis tūrinis našumas ir paprasta konstrukcija. Kai kurių sluoksninių aparatų korpusas turi apvalkalinį šilumokaitį, kuris reikalingas medžiagai ekstrahuoti arba tirpinti nurodytoje temperatūroje.

23 DALIS

KRISTALIZACIJA

23.1. Kristalizacijos proceso fizikiniai pagrindai ir kristalizatorių skaičiavimas

Kietosios fazės – kristalų susidarymas iš tirpalų, lydinių ir iš dujų arba garų vadinamas kristalizacija. Kristalizacija plačiai naudojama chemijos, naftos perdirbimo, metalurgijos, farmacijos, maisto ir kitose pramonės šakose tokiems tikslams: kristalinei fazei išskirti iš tirpalų ir lydinių, mišiniams perskirti dalinės vienkartinės arba daugkartinės kristalizacijos būdu, labai grynoms medžiagoms gauti arba priemaišoms iš jų išvalyti, auginant monokristalus. Didelio kiekio kristalų gavimas pramoniniu mastu vadinamas masine kristalizacija. Masinės kristalizacijos metu gaunamas birus produktas – įvairaus dydžio kristalai.

Kiekvienos kietosios medžiagos kristalai turi specifinę geometrinę formą. Iš viso yra žinomos 32 kristalų simetrijos rūšys. Jos suskirstytos į 7 kristalografines sistemas, vadinamas singonijomis, – triklininę, monoklininę, ortorombinę, romboedrinę, tetragoninę, heksagoninę, kubinę.

Kristalizacijos procesas vyksta tik tuomet, kai pradinė fazė yra persotintosios arba peraušintosios būsenos. Persotintaisiais vadinami tirpalai, kurių koncentracija didesnė už ištirpusios medžiagos tirpumą. Kadangi persotintieji tirpalai yra nestabilūs, tai iš jų išsiskiria perteklinis ištirpusios medžiagos kiekis, t. y. vyksta kristalizacija. Pasibaigus kristalizacijai gaunamas sotusis tirpalas. Toks tirpalas vadinamas likusiu tirpalu, nuo kurio kristalai atskiriami nusodinimu, filtravimu, centrifugavimu arba kitais metodais.

Kristalizaciją sudaro dvi pagrindinės stadijos – kristalizacijos centrų arba užuomazgų susidarymas ir kristalų augimas, paprastai abi šios stadijos vyksta tuo pačiu metu. Kai kristalizacijos centrų susidarymo greitis yra didesnis už kristalų augimo greitį, tai gaunama daug smulkių kristalų. Jeigu kristalizacijos centrų susidarymo greitis mažesnis už kristalų augimo greitį, gaunama mažiau kristalų, bet jie būna stambesni.

Kristalizacijos centrų susidarymas prasideda ne visame tirpalo arba lydinio tūryje, o tik tam tikruose taškuose; tai gali būti įvairios mechaninės priemaišos, aparato sienelės šiurkštumo elementai ir kiti atsitiktiniai veiksniai. Tolygiam kristalizacijos centrų atsiradimui visame tirpalo arba lydinio tūryje paspartinti į aparatą tiekiami priedai – smulkios besikristalizuojančios medžiagos dalelės, kurios ir yra kristalizacijos centrai. Kai reikia gauti didelius kristalus, kristalizaciją pradedančių centrų skaičius turi būti nedidelis.

Pramonėje ir laboratoriniuose tyrimuose dažniausiai naudojama kristalizacija iš tirpalų ir lydinių. Kristalizacija iš tirpalų paprastai išgaunamos ir perskiriamos arba išgryninamos ištirpusios neorganinės medžiagos. Šiuo atveju kristalizacija vyksta žemesnėse temperatūrose negu kristalinant tas pačias medžiagas iš jų lydinių. Kristalizacijos iš tirpalų procesas yra atvirkščias tirpimui. Todėl kristalizacijos šiluminis efektas lygus tirpimo šiluminiam efektui su priešingu ženklu. Tirpdama medžiaga šilumą sugeria, o kristalizuodamasi ją išskiria ir atvirkščiai. Kai kada šie efektai, vykstant šalutiniams procesams, pvz., susidarant kristalų hidratams ir kt., gali būti nevienodi.

Pramonėje naudojami du kristalizacijos metodai: izoterminis, kai persotintasis tirpalas gaunamas išgarinant dalį tirpiklio, esant pastoviai tirpalo koncentracijai (temperatūra taip pat pastovi), ir izohidratinis, kai persotintasis tirpalas gaunamas aušinant ir išlaikant tirpiklio masę pastovią, ką rodo metodo pavadinimas.

Be paminėtų pagrindinių kristalizacijos metodų, pramonėje dar naudojamas išsūdymas, kai dedama priedų (druskų, rūgščių ir kt.), sumažinančių besikristalizuojančių medžiagų tirpumą.

Nagrinėti kristalizacijos pavyzdžiai yra tik fizinis kristalų fazės susidarymo procesas. Kristalizacija su chemine reakcija vadinama aduktyviąja kristalizacija. Taip kristalizuojant, į tirpalą pridedama reagento, su išsiskiriančia medžiaga sudarančio kompleksinį junginį – aduktą. Gautus kompleksinius kristalinius junginius atskyrus nuo tirpalo, atliekamas jų terminis skaidymas, kurio metu tikslinis produktas atskiriamas nuo pridėto ir kompleksą sudarančio reagento.

Kristalizacijos procesas gali būti periodinis ir nuolatinis. Periodinis naudojamas mažiems, o nuolatinis – dideliems tirpalo kiekiams perdirbti.

Skiriamos šios pagrindinės technologinio kristalizacijos proceso stadijos: persotintojo tirpalo paruošimas, kristalizacijos centrų susidarymo sužadinimas, kristalų augimas, susidariusių kristalų išskyrimas iš tirpalo ir išskirtos kristalinės medžiagos džiovinimas bei tolesnis perdirbimas.

23.1.1. Kristalizacijos pusiausvyra

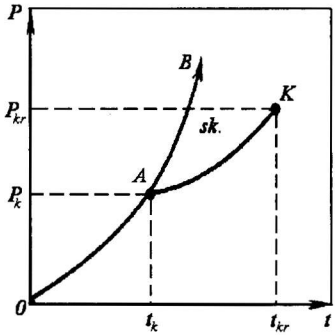
Medžiagų tirpumas skystuose tirpikliuose priklauso nuo tirpstančių medžiagų ir tirpiklių cheminės kilmės, temperatūros ir slėgio. Pramoniniuose procesuose kaip tirpiklis dažnai naudojamas vanduo, taip pat kai kurie organiniai junginiai – spiritai, angliavandeniliai ir kt.

Daugelio medžiagų tirpumas, kylant temperatūrai, didėja. Temperatūrai sumažėjus, tokie tirpalai tampa persotinti ir pereina į nenuostoviosios pusiausvyros būseną, kurios trukmė priklauso nuo nukrypimo nuo pusiausvyros dydžio, ištirpusios medžiagos ir tirpiklio savybių. Iš šios būsenos tirpalui pereinant į pusiausvyros būseną, išsiskiria kristalai, t. y. prasideda kristalizacija. Ribiniam (maksimaliam) persotinimui turi įtakos ištirpusios medžiagos ir tirpiklio savybės, tirpalo temperatūra, aušinimo greitis, priemaišų buvimas, mechaninis poveikis ir t. t. Todėl ribinis (maksimalus) persotinimas nustatomas eksperimentiškai arba apskaičiuojamas pagal empirines lygtis.

Priklausomybė tarp slėgio ir temperatūros kristalizacijos metu keičiantis fazėms išreiškiama Klaudijaus ir Klapeirono lygtimi:

$$dP/dT = q/[T \cdot (V_1 - V_2)];$$

čia q – kristalizacijos (iš skysčių arba dujų) šiluma; V_1 – skystosios būsenos (skysčiui pereinant į kietąją būseną) arba dujinės būsenos (iš dujinės pereinant į kietąją būseną) medžiagos savitasis tūris; V_2 – kietosios būsenos medžiagos savitasis tūris.



23.1 pav. Sistemos *dujos (garai)-skystis-kietoji medžiaga* būsenos diagrama

Paprastai $V_1 > V_2$, kadangi daugelio medžiagų, pereinančių į kietąją būseną, savitasis tūris mažėja, nes didėja jų tankis. Tokiu atveju $dP/dT > 0$, t. y. slėgis P, kuriam esant keičiasi fazės, didėja, didėjant temperatūrai.

Sistemos *dujos-skystis-kietoji medžiaga* būsenos diagrama pavaizduota 23.1 pav. Trigubajame taške A tuo pačiu metu pusiausviros yra dujos, skystis ir kietoji medžiaga, kas atitinka Gibso taisyklę. Vieno komponento sistemos $K = 1$, $F = 3$ (taškui A), o laisvės laipsnių skaičius

$$C = K + 2 - F = 1 + 2 - 1 = 0,$$

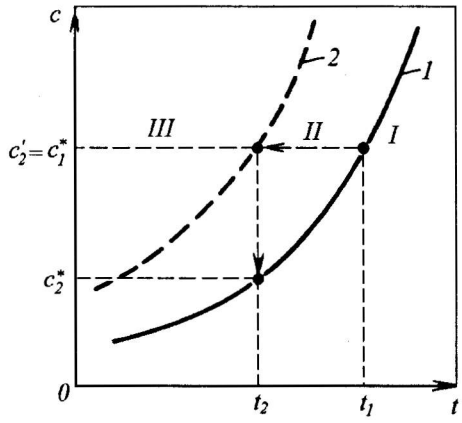
t. y. keičiantis bet kuriam parametrui (temperatūrai arba slėgiui), išnyksta viena iš fazių.

Linija *0A* yra sublimacijos kreivė. Ji atspindi kietosios fazės perėjimo į dujų fazę, aplenkiant skystį, sąlygas arba atvirkščiai (desublimacijos procesas). Kai trigubojo taško *A* slėgis yra didesnis už P_k, bet mažesnis už P_{kr}, medžiaga iš dujinės fazės į kietąją fazę pereina tik per skystąją fazę.

Linija *AK* yra skysčio perėjimo į dujinę fazę kreivė. Taškas *K* apibūdina sistemos kritinę būseną. Esant temperatūroms, aukštesnėms už t_{kr}, skirtumas tarp dujinės ir skystosios fazių išnyksta.

Linija *AB* atspindi skysčio perėjimo į kietąją fazę kreivę, kuri be galo tęsiasi į viršų. Tai paaiškinama tuo, kad skystoji fazė, skirtingai nuo kristalinės fazės, neturi griežtai apibrėžtos struktūros.

Pusiausvyros sąlygų analizę binarinėse ir daugiakomponentėse sistemose patogu atlikti fazinėse diagramose: koncentracija–temperatūra. Grynų medžiagų tokios priklausomybės pateikiamos žinynuose.



23.2 pav. Pusiausvyros koncentracijos (*1*) ir persotinimo priklausomybė nuo temperatūros: *I–II-III* – atitinkamai nesočiojo tirpalo, metastabilioji ir stabilioji sritys; *1* – tirpumo ir prisotinimo kreivė, *2* – persotinimo kreivė

Koncentracijos priklausomybės nuo temperatūros kreivės pavaizduotos 23.2 pav., kuriame galima išskirti tris sritis. Pirmoji sritis yra žemiau prisotinimo linijos *1* ir atitinka tirpalo būseną iki jo prisotinimo; kristalizacija šioje srityje nevyksta. Punktyrinė persotinimo linija *2* persotintųjų tirpalų sritį dalija į dvi dalis: sąlygiškai pastovią, arba metastabilią, sritį *II* ir nestabilią, arba labilią, sritį *III*, kurioje vyksta masinė kristalizacija.

Persotintieji tirpalai, kurių koncentracija yra srityje *III*, kristalizuojasi greitai, beveik momentaliai. Metastabilioje srityje *II* persotintieji tirpalai tam

tikrą laiką lieka nepakitę, auga tik juose esantys kristalai. Riba tarp sričių *II* ir *III* yra sąlyginė ir priklauso nuo keleto anksčiau išvardytų veiksnių. Tirpalų, kurių tirpumo kreivės staigiai kyla, esant palyginti nedideliam sočiojo tirpalo temperatūros sumažėjimui nuo t_1 iki t_2 (23.2. pav.), būsena pasikeičia pagal liniją $c_1^* = c_2^1$ ir formuojasi kristalai, kol pasiekiama koncentracija c_2^1. Dėl to tirpalo koncentracija sumažėja pagal liniją $c_2^1 c_2^*$. Panašius tirpalus tikslinga kristalizuoti juos aušinant, t. y. izohidratiniu metodu, kas leidžia tokių tirpalų būseną greitai pakeisti iš sočiosios į palankią kristalizacijai – metastabilią, o po to – į nestabilią.

Jeigu besikristalizuojančios medžiagos tirpumas labai mažai priklauso nuo temperatūros, tai kristalizuoti izohidratiniu metodu netikslinga. Šiuo atveju racionaliau yra kristalizuoti, pašalinant dalį tirpiklio, pvz., išgarinant, t. y. izoterminiu metodu.

Tarpiniu atveju, kada medžiagų tirpumas, didėjant temperatūrai, didėja lėtai, galima naudoti tiek izohidratinį, tiek izoterminį metodus arba jų derinį.

23.1.2. Kristalizacijos proceso medžiagų ir šilumos balansai

Pagal medžiagų balanso lygtis galima apskaičiuoti susidariusių kristalų, išgarinto tirpiklio bei likusio tirpalo kiekius.

Kristalizacijos proceso medžiagų balanso lygtis pagal bendrą medžiagų kiekį bus

$$G_1 = G_2 + G_{kr} + W, \qquad (23.1)$$

o pagal ištirpusios kristalizuojamos medžiagos kiekį –

$$G_1 \cdot a_1 = G_2 \cdot a_2 + G_{kr} \cdot a_{kr}; \qquad (23.2)$$

čia G_1 – pradinio tirpalo kiekis, kg; G_2 – po kristalizacijos likusio tirpalo kiekis, kg; G_{kr} – kristalų fazės kiekis, įskaitant tirpiklį ir bevandenės kristalų fazės kiekį, perskaičiuotą į ištirpusią medžiagą, kg; W – išgarinto tirpiklio kiekis, kg; a_1 – bevandenės kristalizuojamos medžiagos kiekis pradiniame tirpale, masės dalimis; a_2 – bevandenės kristalizuojamos medžiagos kiekis po kristalizacijos likusiame tirpale, masės dalimis; a_{kr} – bevandenės kristalizuojamos medžiagos kiekis kristaluose, masės dalimis.

Kadangi molių skaičius kristalų fazėje hidrosolvatų forma ir be tirpiklio yra tas pats, tai bevandenių kristalų kiekis G_{kb} gali būti apskaičiuotas pagal tokią lygtį:

$$G_{kb} = G_{kr} \cdot M / M_{kr}; \qquad (23.3)$$

čia G_{kb} – bevandenių kristalų arba į kristalus patekęs ištirpusios medžiagos kiekis, kg; M ir M_{kr} – hidrosolvatų ir bevandenių kristalų molekulinės masės.

Pagal (23.1)...(23.3) lygtis galima apskaičiuoti bevandenės kristalinės fazės (kietosios medžiagos) kiekį G_{kb}:

$$G_{kb} = [G_1 \cdot (a_2 - a_1) - W \cdot a_2] / (a_2 - M/M_{kr}). \qquad (23.4)$$

Jeigu kristalinė fazė savo sudėtyje neturi tirpiklio (t. y. $M/M_{kr} = 1$), (23.4) lygtis užrašoma taip:

$$G_{kb} = [G_1 \cdot (a_2 - a_1) - W \cdot a_2] / (a_2 - 1). \qquad (23.5)$$

Kai ištirpusios medžiagos iškristalizuojamos aušinant tirpalus, $W = 0$. Tada (23.3) lygtis užrašoma taip:

$$G_{kb} = G_1 \cdot (a_1 - a_2) / [(M/M_{kr}) - a_2]. \qquad (23.6)$$

Kai $M/M_{kr} = 1$, gaunama:

$$G_{kb} = G_1 \cdot (a_1 - a_2) / (1 - a_2). \qquad (23.7)$$

Izoterminio ir izohidratinio kristalizacijos procesų šilumos balanso lygtys yra skirtingos. Izoterminės kristalizacijos (t. y. kai išgarinama dalis tirpiklio) šilumos balanso lygtis analogiška garinimo proceso šilumos balanso lygčiai:

$$\begin{aligned} &G_1 \cdot c_1 \cdot t_1 + G_{kb} \cdot q + Q = \\ &= G_{kb} \cdot c_{kb} \cdot t_2 + (G_1 + G_{kb} - W) \cdot c_2 \cdot t_2 + W \cdot h_a + Q_n; \end{aligned} \qquad (23.8)$$

čia c_1, c_2, c_{kb} – pradinio, po kristalizacijos likusio tirpalo ir ištirpusios medžiagos (kristalų) savitoji šiluma, J/(kg·K); t_1 ir t_2 – kristalizacijai tiekiamo ir po kristalizacijos likusio tirpalo temperatūra, °C; q – kristalizacijos šiluma, J/kg; Q – šildalo įneštas šilumos srautas, W; Q_n – šilumos nuostoliai į aplinką, W; h_a – antrinių garų entalpija, J/kg.

Jeigu šildalas yra sotieji vandens garai, tai, naudojantis (23.8) lygtimi, galima apskaičiuoti jų sąnaudas D (atsižvelgiant į tai, kad $Q = D \cdot (h - c_2 \cdot t_2) = D \cdot r$):

$$D = \frac{G_1 \cdot (c_1 \cdot t_2 - c_1 \cdot t_1) + G_{kb} \cdot (c_2 \cdot t_2 - q - c_{kb} \cdot t_2) + W \cdot (h_a - c_2 \cdot t_2) + Q_n}{r}; \qquad (23.8a)$$

čia h ir r – vandens garų entalpija ir kondensacijos šiluma, J/kg; c_{kon} ir t_{kon} – kondensato savitoji šiluma, J/(kg·K), ir jo temperatūra, °C.

Kristalizacijos aušinant tirpalą ($W = 0$) šilumos balanso lygtis užrašoma taip:

$$G_1 \cdot c_1 \cdot t_1 + G_{kb} \cdot q + G_{auš} \cdot c_{auš} \cdot t_{auš,1} = \\ = G_{kb} \cdot c_{kb} \cdot t_2 + (G_1 - G_{kb}) \cdot c_2 \cdot t_2 + G_{auš} \cdot c_{auš} \cdot t_{auš,2} + Q_n ; \quad (23.9)$$

čia $G_{auš}$ ir $c_{auš}$ – aušalo sąnaudos, kg/s, ir jo savitoji šiluma, J/(kg·K); $t_{auš,1}$ ir $t_{auš,2}$ – aušalo temperatūra, °C.

Tada aušalo sąnaudos bus apskaičiuojamos pagal lygtį

$$G_{auš} = \frac{G_1 \cdot (c_2 \cdot t_1 - c_2 \cdot t_2) + (c_2 \cdot t_2 - c_{kb} \cdot t_2) - Q_n}{c_{auš} \cdot (t_{auš,2} - t_{auš,1})}. \quad (23.10)$$

23.2. Kristalizacijos kinetika

Kristalizacijos kinetikai aiškinti taikomas difuzinės kristalizacijos metodas.

Kristalizacija pakankamu greičiu vyksta tik persotintuosiuose tirpaluose. Pirmuoju – indukciniu periodu juose susidaro kristalizacijos centrai. Kristalizacijos centrų susidarymo tirpale pradžia ir greitis priklauso nuo persotinimo laipsnio, tirpiklio ir ištirpusios medžiagos cheminės kilmės, neištirpusios kietos fazės buvimo, elektrinio lauko veikimo ir kitų veiksnių.

Kristalizacijos centrų atsiradimo tirpaluose priežastis yra koncentracijos fliuktuacija, dėl kurios atsiranda kristalų užuomazgos, sudarančios ištirpusios medžiagos molekulių arba jonų sankaupą. Kristalų užuomazgos gali greitai susidaryti vykstant tirpalo molekulių šiluminiam judėjimui. Tokios sankaupos, susidurdamos vienos su kitomis, suyra arba sukibdamos stambėja. Kada stambėdamos kristalų užuomazgos pasiekia tam tikrą kritinį dydį, susidaro kristalizacijos centrai. Pradedant nuo tam tikro kritinio dydžio r_{kr} (apie 0,5 iki 5 nm), centrai pradeda greitai augti ir susidaro daug įvairaus dydžio kristalų. Kuo mažesnis kritinis kristalizacijos centrų spindulys r_{kr}, tuo labiau turi būti persotintas tirpalas. Šis dėsningumas užrašomas tokia lygtimi:

$$ln(c/c^*) = 2 \cdot \sigma \cdot M/(r_{kr} \cdot \rho_k \cdot R \cdot T); \quad (23.11)$$

čia c – tirpalo koncentracija, prasidedant kristalizacijai, kg/m^3; c^* – pusiausvirasis tirpumas, kg/m^3; σ – paviršiaus įtempis, N/m; M – kristalų molekulinė masė; ρ_k – kristalų tankis; R – dujų konstanta, J/(kg·K); T – temperatūra, K.

Dydis c/c^* vadinamas persotinimo laipsniu. Kristalų augimo stadijoje dėl masės mainų su skystąja faze formuojasi stambūs kristalai. Kristalizacijos centrų susidarymo ir kristalų augimo stadijos gali vykti greičiau, didėjant persotinimo laipsniui, esant aukštesnei temperatūrai, intensyviam maišymui, pridedant netirpių kietųjų dalelių.

Kristalams augant, kiekvieno kristalo masės didėjimo greitis priklauso nuo išorinių masės mainų intensyvumo ir ištirpusios medžiagos molekulių

įsiterpimo į kristalinę gardelę greičio. Medžiagos tiekimo į kristalų paviršių greitis aprašomas masės atidavimo lygtimi:

$$dM/(F \cdot d\tau) = \beta_c \cdot (c - c_p), \qquad (23.12)$$

čia M – kristalų fazės masė, kg; β_c – masės atidavimo skystyje (dispersijos terpėje) koeficientas; c – medžiagos koncentracija tirpalo tūryje, kg/m^3; c_p – medžiagos koncentracija prie kristalų paviršiaus, kg/m^3.

Jeigu kristalų masės augimo greitis didelis, tai bendrą kristalizacijos proceso greitį galima apskaičiuoti pagal (23.12) lygtį, kadangi šiuo atveju pagrindinis pasipriešinimas procesui (t. y. ribojančioji proceso stadija) bus sukoncentruotas tirpalo fazėje.

Kristalų masės didėjimo (arba molekulių įsiterpimo į kristalą) greitis užrašomas tokia priklausomybe:

$$dM/(F \cdot d\tau) = \beta_k \cdot (c_p - c^*); \qquad (23.13)$$

čia β_k – masės atidavimo kietojoje (disperguotoje) fazėje koeficientas; c^* – prisotinimo koncentracija.

Pagal (23.13) lygtį galima apskaičiuoti bendrą kristalizacijos proceso greitį, jeigu medžiagos tiekimo į kristalų paviršių greitis didelis, t. y. ribojančioji stadija yra kristalo masės didėjimo greitis.

Kai procesų dispersijos terpėje ir disperguotoje (kietojoje) fazėje greičiai artimi, tai bendrą proceso greitį galima apskaičiuoti pagal masės perdavimo lygtį (gaunama palyginus (23.12) ir (23.13) lygtis):

$$dM = \left[(c - c^*)/(\beta_c^{-1} + \beta_k^{-1})\right] \cdot F \cdot d\tau = K_c \cdot (c - c^*) \cdot F \cdot d\tau; \qquad (23.14)$$

čia $K = (1/\beta_c + 1/\beta_k)^{-1}$ – masės perdavimo koeficientas.

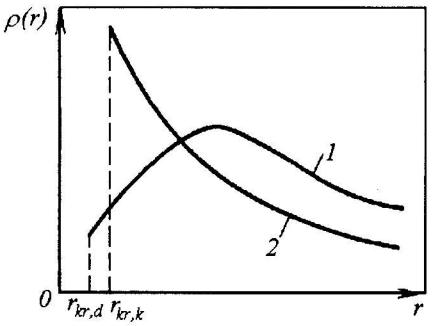
Naudoti (23.14) lygtį kristalizacijos proceso greičiui apskaičiuoti sunkina tai, kad nėra bendros lygties K_c apskaičiuoti. Be to, kristalo masės didėjimo proceso greičio priklausomybė nuo varos jėgos $(c_p - c^*)$ ((23.13) lygtis) ne visada yra tiesinė.

Difuzinėje srityje, kada bendras proceso greitis aprašomas masės atidavimo lygtimi (23.12), kai $c_p = c^*$, kristalizacija gerokai paspartėja, didėjant difuzinio pasienio sluoksnio storį mažinančių parametrų (srauto greičio, maišyklės sukimosi dažnio, molekulinės difuzijos koeficiento ir terpės klampos) vertėms, kitaip tariant, – didėjant Reinoldso ir difuzinio Prandtlio kriterijaus vertėms.

Temperatūrai didėjant, terpės klampa mažėja, o kartu mažėja ir kristalų minimalus kritinis dydis ((23.11) lygtis), kurį pasiekus prasideda masinė kristalizacija ir didėja kristalų susidarymo greitis.

Kristalų užuomazgų susidarymo greičio santykis su jų augimo greičiu lemia galutinį kristalų dydį. Didėjant kristalizacijos temperatūrai, maišymo greičiui ir persotinimo laipsniui, sumažėja vidutinis gautų kristalų dydis, nes užuomazgų susidarymo greitis šiais atvejais didėja greičiau negu kristalų masės didėjimo greitis.

Susidarantys kristalai taip pat mažėja didėjant tirpalo aušinimo greičiui ir mažėjant ištirpusios medžiagos molekulinei masei. Kuo mažesni susidaro kristalai, tuo mažiau juose yra priemaišų. Smulkių kristalų produktas sunkiai atskiriamas nuo tirpalo.



23.3 pav. Kristalų pasiskirstymo pagal dydį tankis: *1* – difuzinėje srityje ($Nu' \approx 2$); *2* – kinetinėje srityje, esant pastoviam kristalų augimo greičiui

Kristalai pagal dydį gali pasiskirstyti labai įvairiai. Be anksčiau išvardytų veiksnių, turinčių įtakos vidutiniam kristalų dydžiui, dalelių pasiskirstymas pagal dydį priklauso nuo srautų struktūros aparate (t. y. nuo dalelių pasiskirstymo pagal jų buvimo aparate trukmę) ir nuo to, kokia masės pernešimo stadija lemia kristalizacijos proceso greitį.

23.3 pav. pavaizduota diferencialinė kristalų pasiskirstymo pagal dydį funkcija $[\rho = f(r)]$ visiško sumaišymo aparato difuzinėje srityje (1 kreivė), kada greitis yra sąlygojamas išorinių masės mainų ($Nu' \approx 2$), ir kinetinėje srityje (2 kreivė), kada kristalų augimo greitis yra ribojamas molekulių įsiterpimo į kristalinį tinklelį ir nepriklauso nuo kristalų dydžio.

23.4. Mišinių perskyrimas kristalizuojant

Kristalizacija gali būti naudojama, norint gauti iš tirpalų arba lydinių kristalinę fazę arba perskirti mišinius. Mišinių perskyrimas kristalizuojant remiasi skystosios arba kristalinės fazės prisodrinimu arba jose esančio tikslinio komponento kiekio sumažinamu, atliekant vienkartinę arba daugkartinę kristalizaciją. Panagrinėsime sistemos, susidedančios iš dviejų ištirpusių medžiagų, ir tirpiklio perskyrimą kristalizacijos būdu.

Fizikine prasme mišinių perskyrimo dalinės kristalizacijos būdu metodai analogiški distiliacijos metodams (sistemoje *garai-skystis*). Pagal analogiją su distiliacija koncentracijų pusiausvirose kristalinėje ir skystojoje fazėse santykis (α) vadinamas perskyrimo koeficientu:

$$\alpha = x \cdot (1 - y)/[(1 - x) \cdot y]. \qquad (23.15)$$

Skirtingai nuo distiliacijos, tikslinis komponentas kaupiasi kietojoje fazėje, todėl kristalizacijos perskyrimo koeficientas yra atvirkščias dydis distiliacijos perskyrimo (santykinio lakumo) koeficientui.

Perskyrimo koeficientas parodo, kiek tikslinis komponentas yra sukoncentruotas kristalinėje fazėje, palyginti su skystąja faze. Visiško perskyrimo atveju, kada $x << 1$ ir $y << 1$, kietojoje ir skystojoje fazėse yra priemaišų, o perskyrimo koeficientą galima išreikšti taip: $\alpha = x/y$. Kai $\alpha > 1$, priemaišos koncentruojasi iškrintančiuose kristaluose, o kai $\alpha < 1$, priemaišų daugėja likusiame tirpale.

Tariame, kad kristalizacijos procesas yra pusiausviras, o pasiskirstymo koeficientas α pastovus. Pažymime: pradinio tirpalo kiekį G_p, proceso metu susidariusį kristalų kiekį – $G_{k.g}$ ir likusio tirpalo kiekį – G_g. Tuomet medžiagų balanso lygtys užrašomos taip:

$$G_p = G_{k.g} + G_g; \qquad (23.16)$$

$$G_p \cdot y_p = G_{k.g} \cdot \bar{x} + G_g \cdot y_g; \qquad (23.17)$$

čia $\bar{x}$ – vidutinė priemaišų koncentracija kristaluose.

Užrašytoje lygčių sistemoje yra trys nežinomieji: $G_{k.g}$, G_g ir $\bar{x}$ arba y_g. Šią lygčių sistemą papildysime medžiagų balanso, esant be galo mažai kristalizacijos proceso trukmei, lygtimi. G_K ir G pažymimi kristalinės ir skysčio fazės kiekiai bet kuriuo laiko momentu , o y ir x – priemaišų koncentracijos skystojoje ir kristalinėje fazėse.

Per be galo trumpą laiką priemaišų kiekio skystojoje fazėje pokytis bus lygus $-d(y \cdot G)$, per tą patį laiką į kristalinę fazę pereis $x \cdot dG_K$ priemaišų. Palyginę priemaišų kiekių pokyčius fazėse, gausime:

$$-d(y \cdot G) = x \cdot dG_K.$$

Kadangi $-dG = dG_K$, gauname:

$$(\alpha - 1) \cdot dG/G = dy/y. \qquad (23.18)$$

Išsprendę diferencialinę (23.18) lygtį, kai $G = G_p$, $y = y_p$, $G = G_p - G_{K.g}$, $y = y_g$, gausime:

$$y_g = y_p \cdot (1 + G_K/G_g)^{\alpha - 1}. \qquad (23.19)$$

Bet kuriam laiko momentui ši lygtis užrašoma taip:

$$y = y_p \cdot \left(1 - G_K / G_g\right)^{\alpha - 1}. \qquad (23.20)$$

Išsprendus (23.16), (23.17) ir (23.19) lygtis galima nustatyti skystosios ir kietosios fazių kiekius G_g, $G_{K.g}$ ir jų koncentracijas y_g arba $\bar{x}$. Priemaišų kiekis kristaluose apskaičiuojamas taip:

$$\bar{x} = \left(y_p \cdot G_p / G_{K.g}\right) \cdot \left[1 - \left(1 - G_K / G_p\right)^{\alpha}\right]. \qquad (23.21)$$

Atsižvelgiant į šią išraišką, vidutinė pasiskirstymo koeficiento vertė apskaičiuojama pagal tokią lygtį:

$$\bar{\alpha} = \bar{x} / y_g = \left[\left(1 - G_{K.g} / G_p\right)^{-\alpha} - 1\right] \cdot \left[\left(G_p / G_{K.g}\right) - 1\right]. \qquad (23.22)$$

Reikia pasakyti, kad aprašytoji skaičiavimo metodika naudotina tik pusiausvirajai kristalizacijai, esant be galo dideliam medžiagos pernešimo į fazes skiriantį paviršių greičiui. Kadangi realaus kristalizacijos proceso greitis yra baigtinis (ribotas), tai šiuo atveju pasiskirstymo koeficientas jungia nepusiausvirųjų fazių sudėtis ir todėl tampa masės mainų kinetinių parametrų funkcija.

Perskyrimo koeficiento (pasiskirstymo koeficiento), sujungiančio fazių pusiausvirąsias sudėtis ($\pm\alpha$), ir nepusiausvirojo proceso ($\pm\alpha_n$) paskirstymo koeficiento santykis gali būti apskaičiuotas pagal masės pernešimo difuziniame pasienio sluoksnyje prie kristalinės fazės paviršiaus medžiagų balansą (23.4 pav.).

Priemaišų masės srauto link fazes skiriančio paviršiaus tankis $i_K \cdot y$ (23.4 pav.) dalijasi į du srautus: priemaišų medžiagos masę, pereinančią į kristalus $i_K \cdot x$, ir medžiagos masę, išnešamą difuzijos į mažesnės koncentracijos tirpalą $-D \cdot \left(dy/dn\right) \cdot \rho_y$ (laikoma, kad priemaišų masės perteklius ir atitinkamai jų didelė koncentracija prie kristalinės fazės paviršiaus susidaro esant nedidelei pasiskirstymo koeficiento vertei, t. y. $\alpha < 1$).

Atsižvelgiant į daromas prielaidas, užrašoma tokia lygtis:

$$i_K \cdot y = i_K \cdot x - \left(D \cdot dy/dn\right) \cdot \rho_y,$$

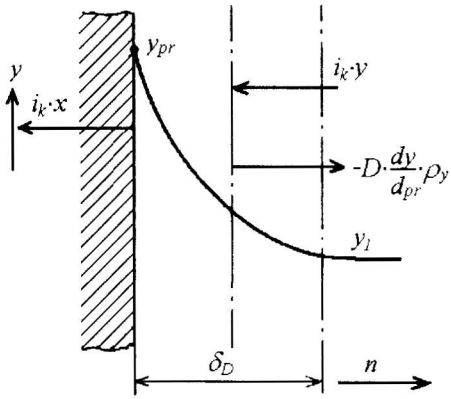
arba

$$dy/\left(x - y\right) = i_K \, dn/\left(D \cdot \rho_y\right).$$

Esant ribinėms sąlygoms $n = 0$, $y = y_{pr}$ ir $n = \delta_D$, $y = y_l$, suintegravus gaunama tokia lygtis:

$$i_K / \beta_T = -ln\left|\left(x - y_l\right)/\left(x - y_p\right)\right|; \qquad (23.23)$$

čia $\beta_T = D \cdot \rho_y / \rho_D$ – išorinio masės atidavimo koeficientas, kg/(m^2·s).



23.4 pav. Medžiagos pernešimo pasienio sluoksnyje schema: i_K – besikristalizuojančios medžiagos masės srauto tankis, y_{pr} – priemaišų koncentracija fazes skiriančiame paviršiuje, y_l – priemaišų koncentracija skystosios fazės branduolyje, y – priemaišų koncentracija laisvai pasirinktame difuzinio sluoksnio skerspjūvyje, ρ_y – priemaišų tankis

Kadangi $x/y_l = \alpha_n$, o $x/y_p = \alpha$, (23.23) lygtis gali būti užrašyta tokia forma:

$$ln(1-1/\alpha) = ln(1-1/\alpha_n) + i_K \cdot \beta_T . \qquad (23.24)$$

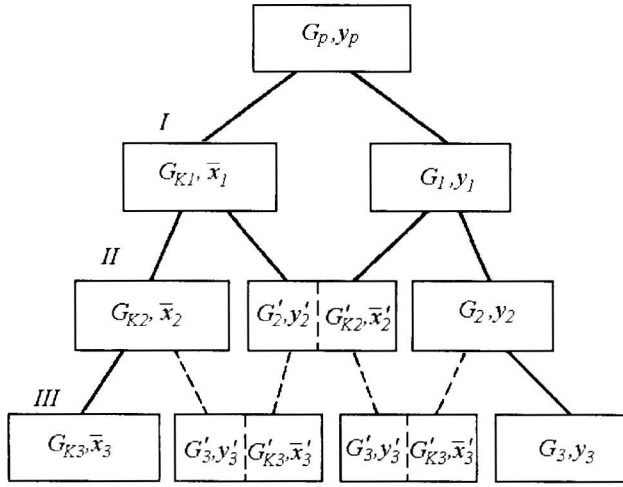
(23.23) ir (23.24) lygtys rodo, kad, esant mažoms priemaišų koncentracijoms ($y << 1$), i_K ir β_T beveik nepriklauso nuo y, o α_n taip pat nepriklauso nuo priemaišų koncentracijos skystyje, jeigu α = *const*. Tai leidžia (23.16) ir (23.22) lygtis panaudoti po kristalizacijos gautiems likusio tirpalo ir kristalų kiekiams, o pakeitus α į α_n, – taip pat ir fazių koncentracijoms apskaičiuoti.

Mišiniai dažniausiai perskiriami daugkartinės kristalizacijos metodu. Vienkartinės kristalizacijos metu kristalų plyšiuose pasilieka nemažai likusio tirpalo, o kristalų paviršiuje adsorbuojasi priemaišos. Dėl to ir dėl kitų priežasčių pasiekiamas nedidelis perskyrimo laipsnis. Daug kartų pakartota kristalizacija leidžia pasiekti didesnį perskyrimo laipsnį. Daugkartinės kristalizacijos metu naudojami nuosekliojo frakcionavimo, priešsrovinės kristalizacijos ir kiti metodai.

Nuoseklusis frakcionavimas atliekamas frakcinės kristalizacijos metodu, kai kiekviena nusėdusi frakcija vėliau dalijama į dvi kitas frakcijas. Iš pradinio tirpalo pirmojoje kristalizacijos pakopoje gaunamos dvi fazės: kristalai ir likęs tirpalas. Kiekviena gauta fazė kitoje pakopoje sudaro dvi naujas frakcijas, pvz., kristalai sudaro naujus kristalus ir likusį tirpalą, o iš susidariusio pirminio likusio tirpalo išsikristalina nauji kristalai ir lieka kitos sudėties likęs

tirpalas, ir t. t. (23.5 pav.). Perskyrimo pakopų, arba laipsnių, skaičius parenkamas pagal reikalingą pasiekti išvalymo laipsnį. Kiekvienai perskyrimo pakopai galima užrašyti medžiagų balanso (23.16), (23.17), (23.19) ir (23.22) lygčių sistemą. Racionaliausias frakcinės kristalizacijos variantas reikalauja, kad kiekvienoje pakopoje susidariusios kietosios ir skystosios fazių kiekių santykis būtų pastovus:

$$G_{Ki}/G_i = \theta = const\ .$$



23.5 pav. Frakcinės kristalizacijos schema: *I, II, III* – pakopos, arba laipsniai

Atsižvelgiant į tai, iš kiekvienai pakopai užrašytų medžiagų balanso lygčių sistemos galima gauti priemaišų kiekio kristaluose koncentracijos išraišką po *n*-osios pakopos, esant pastoviam perskyrimo koeficientui:

$$x_n = y_p \cdot [\overline{\alpha} \cdot (1+\theta)/(1+\overline{\alpha} \cdot \theta)]^n \cdot \qquad (23.25)$$

Jeigu $\alpha < 1$, gaunama išvalyta kristalinė fazė (x_n – maža), o priešingu atveju, t. y. kai $\alpha > 1$, gaunamas išvalytas likęs tirpalas (x_{pr} yra didelė).

Frakcinės kristalizacijos metodu galima pasiekti didelį išvalymo laipsnį, bet jis yra imlus darbo ir nelabai našus. Taip yra dėl to, kad technologiškai sudėtinga atlikti daug kristalizacijos, kristalų separavimo, kristalų maišymo su tirpikliu, tarpinių frakcijų sumaišymo, likusių tirpalų išgarinimo stadijų.

Ne toks sudėtingas ir našesnis yra daugiapakopės priešsrovinės kristalizacijos procesas. Kristalinių ir skystųjų fazių koncentracijų vertes, vykstant *m*

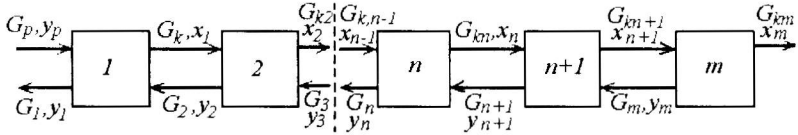
pakopų priešsrovinės kristalizacijos procesui (23.6 pav.), galima apskaičiuoti pagal medžiagų balansą:

$$G_{n+1} \cdot y_{n+1} + G_p \cdot y_p = G_1 \cdot y_1 + G_{Kn} \cdot x_n \cdot$$

Laikydami, kad kiekvienos pakopos fazių debitai ir perskyrimo koeficientas yra pastovūs, gautume:

$$G_m = G_{n+1} = G_n = G_1 = G\,, \quad G_{Km} = G_{Kn+1} = G_{Kn} = G_{K1} = G_K\,,$$

$$x_m / y_m = x_{n+1} / y_{n+1} = x_n / y_n = x_1 / y_1 = \alpha\,.$$



23.6 pav. Priešsrovinės daugiapakopės kristalizacijos medžiagų srautų schema

Taip pat laikoma, kad iš kristalizacijos pakopos ištekančios fazės yra pusiausviros. Atsižvelgiant į prielaidas, medžiagų balanso lygtys užrašomos taip:

$$y_{n+1} - (G_k / G) \cdot a \cdot y_n + (G_p / G) \cdot y_p - y_1 = 0\,. \qquad (23.26)$$

Bendras gautos lygties sprendinys baigtinių skirtumų metodu užrašomas taip:

$$y = B \cdot A^n + (y_1 - C \cdot y_p) / (1 - A)\,; \qquad (23.27)$$

čia B – konstanta.

$$A = (G_k / G) \cdot \alpha = [(G_p - G) / G] \cdot \alpha = (C - 1) \cdot \alpha\,;$$

$$C = G_p / G\,.$$

Konstanta B gali būti apskaičiuojama, naudojant ribines sąlygas $n = 0$; $y_n = y_p$:

$$B = [y_p \cdot (1 - A + C) - y_1] / (1 - A)\,.$$

Iš paskutinės pakopos ištekančio skysčio koncentracija apskaičiuojama taip:

$$y_m = B \cdot A^m - (y_1 - C \cdot y_p) / (1 - A)\,. \qquad (23.28)$$

Priemaišų koncentracija iš aparato paskutinės pakopos ištekančiame skystyje apskaičiuojama pagal tokią lygtį:

$$x_m = \alpha \cdot B \cdot A^m - \alpha \cdot \left(y_1 - C \cdot y_p\right)/(1 - A). \qquad (23.29)$$

Pagal (23.29) lygtį apskaičiuojamas teorinis koncentracijos kitimo pakopų skaičius:

$$m = lg\{(x_m/\alpha \cdot B) - \left(y_1 - C \cdot y_p\right)/[B \cdot (1 - A)]\}/lg\, A. \qquad (23.30)$$

Realių koncentracijos kitimo pakopų skaičius m_r apskaičiuojamas, atsižvelgiant į eksperimentiškai nustatomą pakopos naudingumo koeficientą E:

$$m_r = m/E. \qquad (23.31)$$

23.5. Kristalizatorių konstrukcija ir veikimo principas

Pagal tai, kaip gaunamas persotintasis tirpalas ir pašalinama dalis tirpiklio, skiriami: a) natūraliai aušinami, b) priverstine oro srove aušinami, c) vandeniu arba aušinimo tirpalu aušinami ir d) vakuuminiai kristalizatoriai.

Paprasčiausi yra natūraliai aušinami kristalizatoriai. Dažniausiai tai yra pailgos, atviros stacionarios arba svyruojančios dėžės, kuriose pakabintos juostos, tinklai arba vietoj jų dugne įrengtas juostinis transporteris. Dalis tirpiklio išgaruoja savaime, ir tirpalas pamažu vėsta. Gaunamas persotintasis tirpalas, iš kurio medžiaga kristalizuojasi ant pakabintų tinklų bei vielų arba juostinio transporterio, kuriais susidarę kristalai pašalinami iš kristalizatorių. Likęs tirpalas nupilamas, ir vėl kristalizuojama nauja tirpalo porcija. Šio tipo kristalizatoriai nenašūs, užima daug vietos, todėl jų naudojama nedaug.

Pagal kristalų susidarymo ir jų augimo sąlygas kristalizatoriai skirstomi į: 1) paviršinius, kuriuose kristalai susidaro ir auga ant aušinamo arba šaldomo paviršiaus; 2) tūrinius, kuriuose šie procesai vyksta visame tūryje; 3) mišrius, kuriuose kristalai susidaro ir auga ant šaldomo paviršiaus ir visame tūryje.

Tūriniai kristalizatoriai dar skirstomi į pasrovinius (juose tirpalas ir kristalinė fazė juda ta pačia kryptimi), kristalizatorius-talpyklas (kristalizuojamoji sistema visiškai sumaišoma) ir cirkuliacinius (sudaroma priverstinė tirpalo cirkuliacija). Cirkuliaciniuose kristalizatoriuose pasiekiamas didelis savitasis našumas ir gaunami geros kokybės kristalai, todėl pramonėje jie dažnai naudojami.

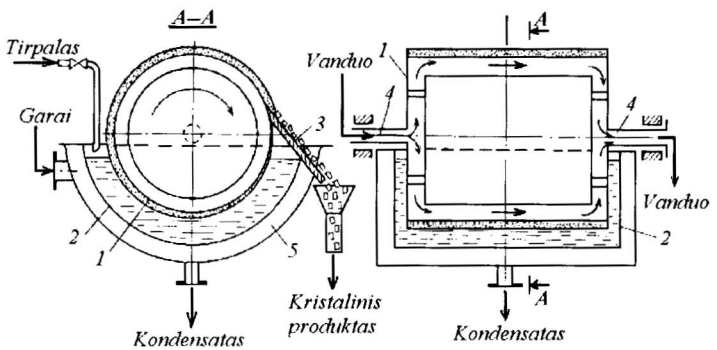
Pagal tai, kaip sudaromos persotinimo sąlygos, kristalizatorius galima skirstyti į tris grupes: 1) izohidratinius (palaikoma pastovi tirpalo masė), 2) vakuuminius (sudaromas vakuumas) ir 3) išgarinančiuosius (dalis tirpalo išgarinama).

Paviršiniai kristalizatoriai. 23.7 pav. pavaizduota izohidratinio būgninio paviršinio kristalizatoriaus konstrukcijos schema. Tokiuose kristalizato-

riuose dažniausiai kristalizuojamos druskos, kurių tirpumas, mažėjant temperatūrai, gerokai mažėja.

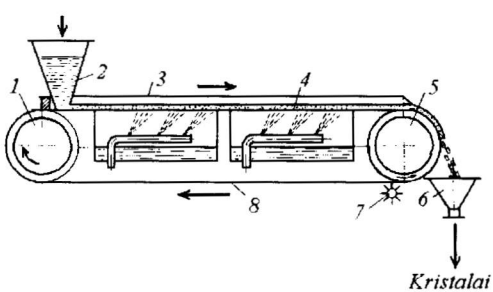
Aparatą sudaro horizontalus besisukantis būgnas *1* su dvigubomis sienelėmis, tarp kurių cirkuliuoja pro tuščiavidurius velenus *4* tiekiamas aušinimo vanduo. Būgnas panardintas į lovyje *2* esantį kristalizuojamąjį tirpalą arba lydalą. Kad nesikristalizuotų per anksti, lovys įdėtas į apvalkalą *5*, kuriame cirkuliuoja tirpalą šildantys garai. Būgno sukimosi greitis būna nuo 0,1 iki 1 m/s. Per vieną būgno apsisukimą jo paviršiuje atsiradusių nuosėdų sluoksnis nužeriamas peiliu *3*.

Būgniniai kristalizatoriai dažniausiai naudojami kristalizuojant iš lydalų arba iš nedaug likusio tirpalo turinčių tirpalų. Šių kristalizatorių trūkumu laikoma tai, kad juose susidaro smulkūs kristalai, todėl į kristalus patenka visos pradiniame tirpale esančios priemaišos.



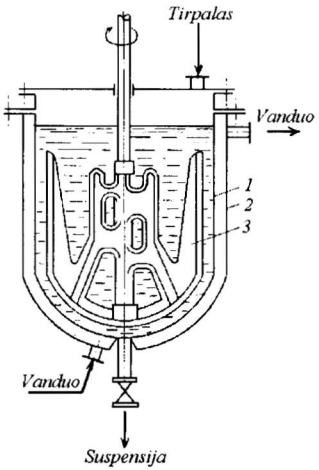
23.7 pav. Būgninis kristalizatorius: *1* – būgnas, *2* – vežimėlis arba lovys, *3* – peilis kristalams pašalinti, *4* – tuščiaviduriai velenai, *5* – garų apgaubas

Lydalams kristalizuoti taip pat naudojami juostiniai kristalizatoriai (23.8 pav.).



23.8 pav. Juostinis kristalizatorius: *1, 5* – būgnai, *2* – talpykla, *3* – bortelis, *4* – kristalų sluoksnis, *6* – surinkimo talpykla, *7* – šepečiai, *8* – judančioji juosta

Šaldant lydalą iš apačios, kristalų sluoksnis *4* formuojasi ant begalinės juostos *8*. Lydalas ant juostos gali būti tiekiami įvairiais būdais: vientisu sluoksniu, juostomis ir t. t. Ant juostos pasilikę kristalai nuvalomi metaliniais šepečiais *7*.

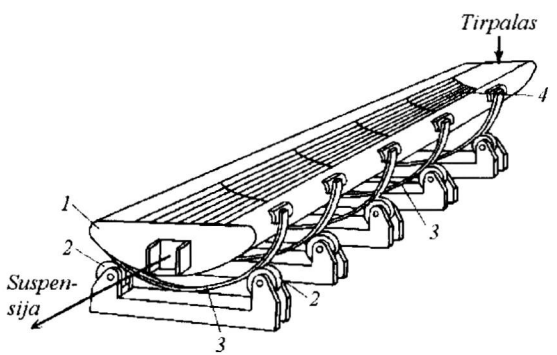


23.9 pav. Periodinio veikimo tūrinis kristalizatorius su maišikliu: *1* – korpusas, *2* – aušinimo apvalkalas, *3* – maišiklis

Tūriniai kristalizatoriai. Paprasčiausias periodinio veikimo aparatas yra tūrinis kristalizatorius su maišikliu ir apvalkaliniu šilumokaičiu (23.9 pav.).

Kad nuosėdos mažiau kibtų prie aparato vidinio paviršiaus, temperatūrų skirtumas tarp tirpalo ir aušinimo vandens (aušalo) turi būti nedidelis (nuo 8 iki 10 °C). Dėl tos pačios priežasties aušalas į aušinimo gaubtą *2* tiekiamas tik tuomet, kai korpusas *1* užpildytas tirpalu ir susidaro pirmieji kristalizacijos centrai. Pasibaigus kristalizacijos procesui, suspensija išleidžiama iš aparato ir kristalai nuo likusio tirpalo atskiriami filtruojant arba centrifuguojant.

Prie tūrinių natūraliai aušinamų kristalizatorių priskiriamas nuolatinio veikimo svyruojantysis kristalizatorius (23.10 pav.).



23.10 pav. Nuolatinio veikimo svyruojantysis kristalizatorius: *1* – lovys, *2* – ritinėliai, 3 – bandažai, *4* – pertvaros

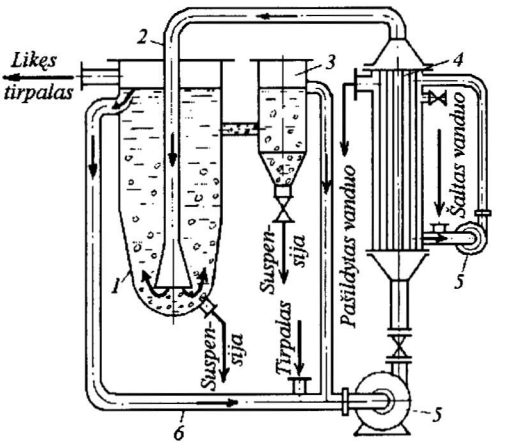
Kristalizatorių sudaro nuo 10 iki 15 m ilgio atviras lovys, turintis bandažus *3*, kuriais jis remiasi į ritinėlius *2*. Lovys pagal išilginę ašį yra pasviręs nedideliu kampu. Valdomas specialia pavara (23.10 pav. ji neparodyta) lovys lėtai svyruoja ant ritinėlių. Tirpalas aušinamas aplinkos oru. Toks procesas neintensyvus. Dėl lėto tirpalo judėjimo ir aušinimo mažėja kristalizacijos centrų susidarymo greitis, todėl tokiuose kristalizatoriuose susidaro stambūs (10...15 mm) kristalai. Jie būna taisyklingos formos, nes yra gerai apiplaunami tirpalo. Tokiuose aparatuose kristalai gali slysti, todėl atsiranda išilginis tirpalo maišymasis ir gaunamas smulkių kristalų produktas. Šiam reiškiniui išvengti lovyje *1* įrengiamos skersinės pertvaros *4*.

Didelis svyruojančiųjų kristalizatorių pranašumas yra tai, kad juose esančiame tirpale nebūna judančių dalių. Tačiau aparatai gana dideli, nelabai našūs, dėl tirpalo garavimo gamybinėse patalpose gali susidaryti netinkamos darbo sąlygos ir kt.

Pramonėje plačiai paplito įvairios konstrukcijos tūriniai kristalizatoriai su pseudoverdančiuoju kristalų sluoksniu. Intensyvus maišymasis pseudoverdančiajame sluoksnyje didina masės pernešimą, todėl kristalai greičiau auga. Tirpalo persotinimo laipsnis šiuo atveju gana greitai sumažėja. Jeigu temperatūros ir hidrodinaminės sąlygos vienodos, tai, mažėjant tirpalo persotinimo laipsniui, kristalų augimo greitis didėja greičiau, negu susidaro kristalizacijos centrai. Todėl kristalizatoriai su pseudoverdančiuoju kristalų sluoksniu naudojami kristalizuojant mažai persotintus tirpalus, artimus metastabiliajai sričiai. Šio proceso metu būtina reguliuoti persotinimo laipsnį, temperatūrą, kristalų buvimo aparate trukmę. Stambesnieji kristalai greičiau nusėda ant dugno, o mažesnieji toliau auga pseudoverdančiajame kristalų sluoksnyje. Tokiuose kristalizatoriuose galima reguliuoti kristalų dydį.

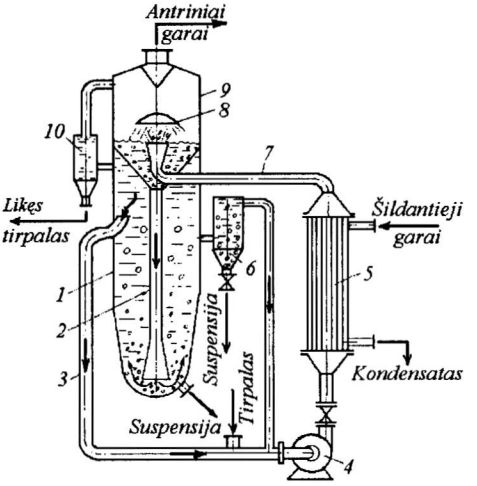
Pseudoverdančiajame kristalų sluoksnyje galima kristalizuoti neišgarinant tirpiklio (izohidratiniu būdu) arba išgarinant dalį tirpiklio (izotermiškai).

23.11 pav. pavaizduotas nuolatinio veikimo izohidratinis kristalizatorius su pseudoverdančiuoju kristalų sluoksniu. Karštas pradinis tirpalas tiekiamas į siurbimo cirkuliacinį vamzdį *6*, kur susimaišo su likusiu tirpalu, cirkuliuojančiu uždaru kontūru. Aušintuve arba šaldytuve *4* atšaldytas tirpalas tampa persotintas. Įtekėjus tirpalui į korpusą *1* ir jam judant iš apačios į viršų, išsiskiria kristalai, jie auga pseudoverdančiajame sluoksnyje. Išsiskyrus kristalams, tirpalo persotinimas sumažėja. Suspensija, kurioje kristalai yra pakankamai stambūs, nepertraukiamai teka pro apatinę aparato dalį ir periodiškai išleidžiama iš nusodintuvo *3*.



23.11 pav. Izohidratinis kristalizatorius su pseudoverdančiuoju kristalų sluoksniu: *1* – korpusas, *2* – centrinis vamzdis, *3* – nusodintuvas, *4* – šaldytuvas, *5* – siurbliai, *6* – cirkuliacijos vamzdis

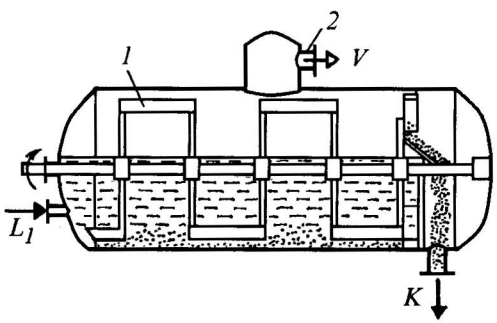
Vakuuminis kristalizatorius su pseudoverdančiuoju kristalų sluoksniu (23.12 pav.) naudojamas kristalizuojant druskų tirpalus, kurių tirpumas, kintant temperatūrai, mažai keičiasi.



23.12 pav. Vakuuminis kristalizatorius su pseudoverdančiuoju kristalų sluoksniu: *1* – korpusas, *2, 3, 7* – cirkuliacijos vamzdžiai, *4* – siurblys, *5* – šilumokaitis, *6* – nusodintuvas, *8* – srauto atsimušimo elementas, *9* – separatorius, *10* – likusio tirpalo surinkimo talpykla

Tokiuose aparatuose dalis tirpiklio išgaruoja virš garinamo tirpalo sudarius vakuumą. Šių aparatų konstrukcija tokia pat kaip garintuvų. Pirminis tirpalas tiekiamas į cirkuliacinį vamzdį *3* ir kartu su likusiu tirpalu – į šilumokaitį *5*. Čia pašildytas iki virimo temperatūros tirpalas patenka į išsiplečiančią vamzdžio dalį *7* ir joje smarkiai užverda. Po to persotintasis tirpalas vamzdžiu *2* nusileidžia į apatinę aparato *1* dalį, kurioje susidaro ir auga kristalai. Stambesni kristalai kartu su dalimi likusio tirpalo suspensijos pavidalu iš apatinės aparato dalies išleidžiami nepertraukiamai, o iš nusodintuvo *6* – periodiškai.

Vakuuminiai kristalizatoriai gali būti periodinio ir nuolatinio veikimo. Paprasčiausias periodinio veikimo kristalizatorius yra hermetiškas aparatas su maišikliu, sujungtas su vakuumo sistema (23.13 pav.).

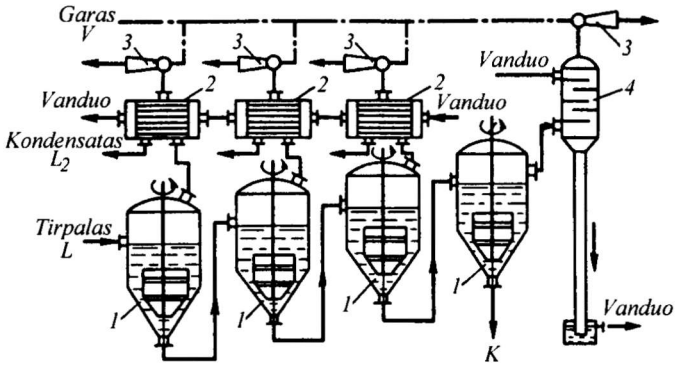


23.13 pav. Būgninis vakuuminis kristalizatorius
su maišikliu: *1* – maišiklis, *2* – vamzdis, jungiantis sistemą su vakuumo linija

Įpylus į kristalizatorių tirpalo ir sujungus su vakuumo sistema, garinama tol, kol pašalinamas norimas tirpiklio kiekis. Po to kristalizatorius atjungiamas nuo vakuumo, palaipsniui slėgis aparate padidinamas iki atmosferos slėgio. Išpylus susidariusius kristalus bei likusį tirpalą, kristalizacija pradedama su nauju tirpalu. Sujungus kelis tokius kristalizatorius į vieną sistemą, kristalizacijos procesą galima vykdyti nuolatiniu būdu.

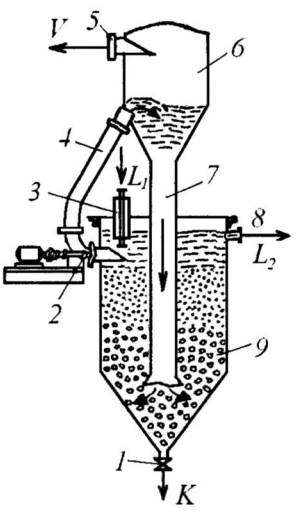
Vakuuminiuose kristalizatoriuose galima greičiau išgarinti dalį tirpiklio ir ataušinti kristalizuojamąjį tirpalą. Šiuo būdu medžiagos kristalizuojasi daug greičiau negu esant atmosferos slėgiui.

Daugiapakopio (keturių pakopų) vakuuminio nuolatinio kristalizacijos proceso schema pavaizduota 23.14 pav. Tirpalas iš kiekvieno žemiau esančio kristalizatoriaus dėl slėgių skirtumo (susidariusio vakuumo) įsiurbiamas į aukščiau esančius kristalizatorius. Vakuumas susidaro vykstant kondensacijai pirmųjų trijų korpusų vandeniu aušinamuose paviršiniuose kondensatoriuose *2* ir barometriniame kondensatoriuje *4*, į kurį patenka garai iš *4*-ojo kristalizatoriaus. Nesusikondensavę garai iš sistemos pašalinami ežektoriais *3*.

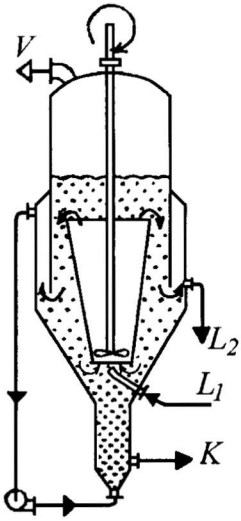


23.14 pav. Daugiapakopio vakuuminio nuolatinio kristalizacijos proceso schema: *1* – kristalizatoriai, *2* – garų kondensatoriai, *3* – ežektoriai, *4* – barometrinis kondensatorius

Nuolatiniu būdu galima kristalizuoti ir viename aparate (23.15 pav.).



23.15 pav. Nuolatinio veikimo vakuuminis kristalizatorius: *1* – kristalų pašalinimo vamzdžio sklendė, *2* – siurblys, *3* – pradinio tirpalo tiekimas, *4* – tirpalo cirkuliacijos vamzdis, *5* – vamzdis, jungiantis sistemą su vakuumo linija, *6* – garintuvas, *7* – barometrinis vamzdis, *8* – po kristalizacijos likusio tirpalo ištekėjimo kanalas, *9* – kristalų rinktuvas



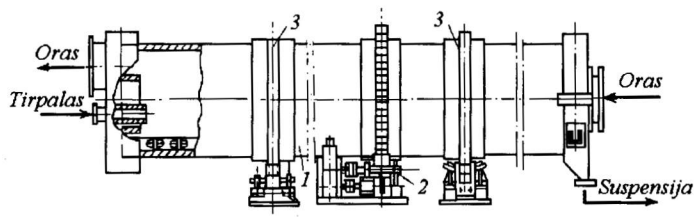
23.16 pav. Nuolatinio veikimo pseudoverdančiojo sluoksnio vakuuminis kristalizatorius, kuriame įtaisytas sukamas kūginis vamzdis

Pradinis tirpalas vamzdžiu *3* leidžiamas į rinktuvą *9*. Iš jo dalis tirpalo siurbliu *2* pro vamzdį *4* tiekiama į garintuvą *6*, sujungtą su vakuumo sistema. Išgaravus daliai tirpiklio, tirpalas vamzdžiu *7* iš garintuvo *6* išteka į rinktuvą *9*. Čia iškrinta kristalai, kurie iš sistemos visą laiką šalinami pro specialią sklendę *1*. Dalis po kristalizacijos likusio tirpalo kanalu *8* teka iš rinktuvo *9*, o kita dalis kartu su nuolat tiekiamu pradiniu tirpalu L_1 siurbliu *2* vėl grąžinama į garintuvą *6*.

Vakuuminiai kristalizatoriai yra našūs ir kompaktiški, todėl, nors ir nelengva sudaryti bei palaikyti vakuumą, jų eksploatuojama gana daug.

Pastaruoju metu vis daugiau naudojama kristalizatorių, kuriuose kristalizuojami persotintieji tirpalai ir verčiami intensyviai cirkuliuoti („virti" tirpale) susidarę kristalai. Intensyviai tirpalo cirkuliacijai panaudojamas siurblys ir centrinis cirkuliacijos vamzdis, kuris būna nejudamas arba besisukantis (23.16 pav.). Kadangi kristalizuojami šiek tiek persotinti tirpalai, tai šių kristalizatorių našumas nėra didelis. Didžiausias jų pranašumas tas, kad gaunami stambūs (iki 2 mm) kristalai.

Paviršiniai-tūriniai arba mišrūs kristalizatoriai. Prie tokio tipo kristalizatorių galima priskirti būgninius kristalizatorius, kuriuose tirpalas aušinamas oru (23.17 pav.).



23.17 pav. Būgninis kristalizatorius, kuriame tirpalas aušinamas oru:
1 – besisukantis būgnas, *2* – pavara, *3* – bandažai

Kristalizatoriaus korpusą sudaro truputį pasviręs variklio per reduktorių *2* sukamas būgnas *1* su bandažais *3*. Karštas tirpalas, tiekiamas į viršutinį būgno galą, nepertraukiamai maišomas ir aušinamas oru, judančiu priešinga kryptimi, negu juda tirpalas. Ant vidinio būgno paviršiaus susidarę kristalai neturi įtakos kristalizatoriaus našumui, nes tirpalas aušta tiesiogiai liesdamasis su oru. Šiems kristalams šalinti būgno viduje pagal visą jo ilgį įmontuotos judančios grandinės, kurios, būgnui sukantis, nudaužo kristalus ir jie maišosi su pagrindine jų mase būgne.

Kristalizatoriaus pagrindinių matmenų nustatymas. Kai aušinama vandeniu arba tirpalu, kristalizatoriai skaičiuojami taip pat kaip ir šilumokaičiai (žr. 13.1 sk.), t. y., nustačius pagal šilumos balansą pašalinamą šilumos

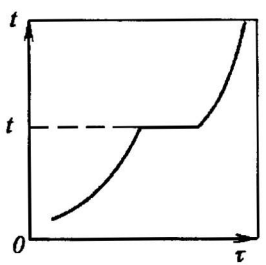
kiekį, pirmiausia apskaičiuojamas šilumokaičio paviršiaus plotas (paprastai jis sudaro nuo 2 iki 30 m^2), o paskui reikalingas kristalizatoriaus tūris (siekia 10 m^3). Periodinio veikimo kristalizatoriaus tūris apskaičiuojamas vienam kristalizacijos ciklui. Vakuuminių ir oru aušinamų kristalizatorių skaičiavimo metodika dar nesudaryta. Kol kas vadovaujamasi bandymų duomenimis. Vakuuminių kristalizatorių garinimo paviršius gali būti apskaičiuotas laikant, kad nuo 1 m^2 paviršiaus per valandą išgarinama 150 kg vandens.

23.6. Lydinių kristalizacija

23.18 pav. pavaizduota, kaip keičiasi temperatūra t lėtai kaitinant kietąją medžiagą. Iš šio paveikslo matyti, kad kreivė $t = f(\tau)$ turi horizontalią atkarpą, atitinkančią lydymosi temperatūrą t_{lyd}. Ši atkarpa matoma iki to momento, kol medžiaga visiškai išsilydo.

Kristalai lydinyje susidaro (atsiranda ir auga) taip pat, kaip ir vykstant kristalizacijai iš tirpalų. Šiuo atveju, vertinant proceso greitį, vietoj tirpalų persotinimo termino vartojamas peraušinimo arba peršaldymo terminas.

Vienkartinio frakcinio lydymo metu pradinis mišinys pradžioje lėtai atšaldomas iki visiškos kristalizacijos. Po to susidariusi kristalų masė kaitinama nuo kristalizacijos temperatūros iki frakcionavimo temperatūros. Gauta suspensija filtruojama. Po filtravimo gauta kristalinė fazė prisodrinama aukštesnės lydymosi temperatūros komponento.



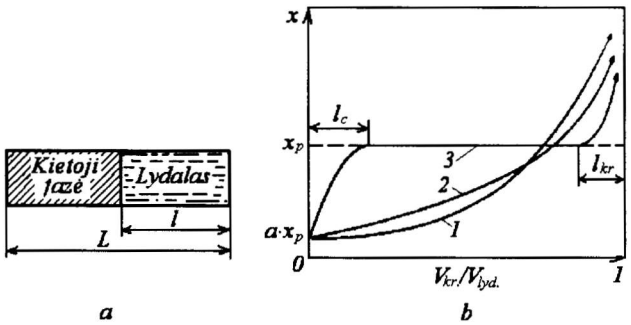
23.18 pav. Temperatūros t kitimas kaitinant kietąją medžiagą

Proceso efektyvumui padidinti naudojamas daugkartinis, arba daugiapakopis, frakcinis lydymas. Daugiapakopio perskyrimo schemos yra analogiškos daugiapakopės frakcinės kristalizacijos schemoms (žr. 23.5 ir 23.6 pav.).

Frakcinio lydymo procesai naudojami, pavyzdžiui, naftalinui išskirti iš ksileno izomerų perskyrimu praskiestų nafteninių frakcijų, vandeniui gėlinti, vandeniniams tirpalams koncentruoti, riebalams frakcionuoti ir panašiems procesams. Frakcinio lydymo procesai vykdomi valciniuose, juostiniuose, būgniniuose ir kituose kristalizatoriuose, taip pat kristalizatoriuose su pseudoverdančiuoju kristalų sluoksniu.

Kryptingoji kristalizacija. Šį kristalizacijos (frakcionavimo) metodą, kaip ir anksčiau nagrinėtus, galima taikyti tik tuo atveju, kai medžiaga pereina iš vienos agregatinės būsenos į kitą ir kai procese susidaro *pusiausviros skirtingos sudėties fazės*. Metodo pagrindą sudaro šilumos šalinimas nuo fazes

skiriančio paviršiaus, dėl kurio atsiranda kryptingas kristalizacijos fronto judėjimas išilgai valomo bandinio, lėtai judant kietajai fazei ir lydalo zonoms (23.19 pav., *a*). Kryptingos kristalizacijos (23.19 pav., *b*) procesą tikslinga naudoti, kai reikia labai švariai išvalyti nedidelius medžiagų kiekius, kurie preliminariai buvo valomi kitais metodais.



23.19 pav. Medžiagos kietėjimo schema (*a*) ir koncentracijų pasiskirstymas pagal bandinio ilgį (*b*), vykstant kryptingai kristalizacijai ($\alpha < 1$): *1* – vykstant visiškam maišymuisi, *2* – vykstant daliniam lydalo maišymuisi, *3* – vykstant difuziniam pernešimui

Kadangi kristalizacijos metu susidariusios kietosios fazės sudėtis skiriasi nuo lydalo sudėties, tai, judant kristalizacijos frontui išilgai bandinio, priemaišos persiskirsto tarp abiejų fazių. Reikia pasakyti, kad, kai $\alpha < 1$, priemaišų koncentracija kietojoje fazėje būna mažesnė, o kai $\alpha > 1$, – didesnė už jų koncentraciją lydale.

Laikome, kad difuzijos koeficientas kietojoje fazėje lygus nuliui, o fazes skiriančiame paviršiuje susidaro pusiausvyra (t. y. $x = a \cdot y$; čia x ir y priemaišų koncentracijos atitinkamai kietojoje fazėje ir lydale). Taip pat tariame, kad, lydalo zonai judant išilgai bandinio, kristalizacijos frontas išlieka plokščias. Tada kryptingos kristalizacijos proceso priemaišas sudarančio komponento medžiagų balanso lygtis diferencialine forma gali būti užrašoma taip:

$$d\left(y \cdot V_{lyd}\right) = V_{lyd} \cdot dy + y \cdot dV_{lyd} = x \cdot V_{kr}; \qquad (23.32)$$

čia V_{lyd} ir V_{kr} – atitinkamai lydalo ir kietosios fazės tūriai.

Visas bandinio tūris $V_b = V_{lyd} + V_{kr}$. Kadangi (23.32) lygtyje $dV_{lyd} = -dV_{kr}$, tai

$$ln\left(V_{lyd}/V_b\right) = \int_{x_p}^{y} dy/(x-y); \qquad (23.33)$$

čia x_p – pradinė priemaišų koncentracija bandinyje.

Kai žinoma priklausomybė $x = f(y)$, (23.33) lygtis išsprendžiama analitiškai. Jeigu ši priklausomybė tiesinė (t. y. $a = const$), (23.33) lygties sprendinys užrašomas taip:

$$x = a \cdot x_p \cdot \left(V_{lyd}/V_b\right). \tag{23.34}$$

Dažniausiai bandinio skerspjūvis per visą jo ilgį būna vienodas (23.19 pav., *a*). Šiuo atveju (23.34) lygtį galima užrašyti taip:

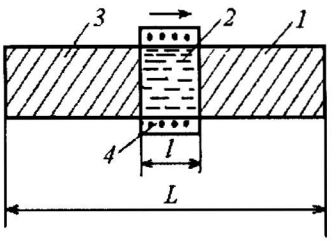
$$x = a \cdot x_p \cdot (l/L)^{a-1}, \tag{23.35}$$

arba $x = a \cdot x_p \cdot \left(1 - V_{kr}/V_b\right)^{a-1}$; (23.36)

čia V_{kr}/V_b – į kristalus perėjusios medžiagos dalis.

Reikia pasakyti, kad (23.34) lygtis yra (23.20) lygties, skirtos kristalizacijai iš tirpalų aprašyti, analogas.

Priemaišų pasiskirstymo pagal bandinio ilgį priklausomybė nuo lydalo maišymosi laipsnio pavaizduota (23.19 pav., *b*).



23.20 pav. Zoninio lydymo schema: *1* – apdorojamas bandinys, *2* – lydalo zona, *3* – kristalizacijos po valymo zona, *4* – kaitinimo elementas

Zoninis lydymas. Šis medžiagos išvalymo kristalizacijos būdu procesas, skirtingai nuo kryptingos kristalizacijos, atliekamas (23.20 pav.) bandinį lėtai lydant. Kaitinimo elementui *4* judant išilgai valomos medžiagos bandinio *1* 0,5...20 cm/h greičiu, bandinyje susidaro lydalo zona *2*, kurios ilgis *l*. Pagal bandinio ilgį *L* tarp fazių susiformuoja du judrūs paviršiai. Pagal vieną iš šių paviršių bandinio medžiaga lydosi, o pagal kitą – kietėja (zona *3*). Judant išlydytai zonai *2* išilgai bandinio, dėl skirtingo priemaišų tirpumo lydale ir kietojoje fazėje jų koncentracija bandinyje persiskirsto.

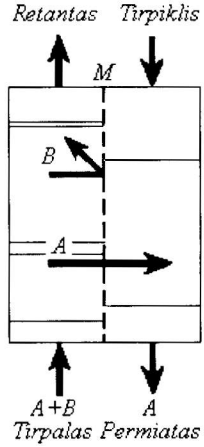
Jeigu $\alpha < 1$, priemaišų tirpumas lydale būna didesnis nei kietojoje fazėje ir jos koncentruojasi lydale. Šiuo atveju priemaišų koncentracija po išlydytosios zonos perėjimo susidariusioje kietojoje fazėje mažėja. Didžiausias išvalymo laipsnis pasiekiamas bandinio pradžioje, kadangi išlydytai zonai judant joje laipsniškai kaupiasi priemaišos ir dėl to padidėja priemaišų koncentracija kietojoje fazėje. Gali būti pasiektas momentas, kada priemaišų koncentracija taps lygi jų pradinei koncentracijai bandinyje. Todėl dažnai per vieną kaitini-

mo elemento paslinkimą bandiniu nepasiekiamas reikalingas perskyrimo arba išvalymo laipsnis ir, norint gauti reikiamą priemaišų koncentraciją arba bandinio švarumą, zoninio lydymo procesas kartojamas daug kartų. Šiuo atveju dalis bandinio, kuriame susikoncentravo priemaišos, nepašalinama, kaip kryptingos kristalizacijos metu. Zoninio lydymo procesui paspartinti kai kada išilgai bandinio slenkamas ne vienas, o keli kaitinimo šaltiniai. Pasiekus reikalingą priemaišų koncentracijos pasiskirstymą, bandinys padalijamas į dvi dalis: užterštoji dalis pašalinama, o kita dalis perlydoma.

24 DALIS

MEMBRANINIAI PROCESAI

Skystųjų medžiagų mišiniai paprastai perskiriami distiliacijos, rektifikacijos, ekstrakcijos, adsorbcijos ir kitais metodais. Iš jų naujausi yra membraniniai procesai, atliekami naudojant puslaides membranas.



24.1 pav. Membraninio perskyrimo proceso schema: *A* ir *B* – tirpalo komponentai, *M* – membrana

Membraniniai procesai nuo kitų procesų skiriasi tuo, kad masės pernašos metu fazes skiria pertvara, vadinama membrana (24.1 pav.). Pro membraną pratekėjęs komponentas vadinamas *permiatu* (lot. *permeare* – praeiti, pratekėti), o sulaikytasis komponentas – *retantu*. Membraniniai procesai iki šiol buvo aiškinami skirtinga komponentų skverbtimi pro membraną, dabar literatūroje randasi ir naujesnių membraninių procesų aiškinimo teorijų.

Chemijos ir naftos perdirbimo pramonėje membraniniai procesai naudojami azeotropiniams ir artimų virimo temperatūrų komponentų mišiniams perskirti; šilumai neatsparioms medžiagoms išskirti; cheminių reakcijų pusiausvyrai perstumti, pašalinant vieną iš reakcijos produktų; tirpalams valyti ir koncentruoti; stambiamolekuliams junginiams ir koloidiniams tirpalams išskirti iš tirpalų ir smulkiamolekuliams komponentams (druskoms, rūgštims, alkoholiams) bei dujoms iš jų valyti; mineralinėms druskoms perskirti; gamtiniam vandeniui, technologiniams ir nutekamiesiems vandenims valyti bei gryninti.

Biotechnologijoje ir medicinos pramonėje membraniniai metodai naudojami biologiškai aktyvioms medžiagoms, vakcinoms, fermentams išskirti bei

valyti; maisto pramonėje – vaisių ir daržovių sultims koncentruoti, pienui tirštinti, aukščiausios kokybės cukrui gaminti.

Pastaraisiais metais intensyviai kuriami dujinių mišinių perskyrimo procesai, pvz., deguonies išskyrimas iš oro, oro prisodrinimo deguonimi, helio ir sieros dioksido išskyrimas iš gamtinių dujų. Puslaides membranas naudoti ekonomiška: galima kurti naujas, paprastas, mažai energijos imlias ir ekologiškas technologijas, ypač kai jos derinamos su rektifikacija, adsorbcija ir ekstrakcija.

Membraninių procesų pranašumais laikytina tai, kad jie yra ekonomiški, mažai imlūs energijos, ekologiški, juos galima naudoti kartu su rektifikacija, adsorbcija, ekstrakcija. Pagrindiniai membraniniai išskyrimo metodai yra atvirkštinis osmosas, ultrafiltravimas, mikrofiltravimas, dializė, elektrodializė, išgarinimas pro membraną.

Kuriami nauji membraniniai metodai: membraninis distiliavimas, elektroosmosinis filtravimas ir kt. Kiekviename iš šių procesų perskiriamasis mišinys liečiasi su puslaide membrana.

Kadangi membraninis procesas yra lėtas masės pernešimo būdas, tai reikalingi dideli membranų paviršiai, o membranos kol kas yra brangios: priklausomai nuo membranų medžiagos jų 1 m^2 kainuoja nuo 2500 iki 5000 eurų. Membranos jautrios staigiems slėgio pokyčiams, smūgiams. Tai didžiausi membraninių procesų trūkumai.

Pro membraną praėjusi skiriamojo mišinio dalis praturtėja vienu arba grupe pro puslaidę membraną prasiskverbusių komponentų, o tiekimo pusėje pasilikusi mišinio dalis tą komponentą arba komponentų grupę praranda. Kartais procesas vyksta iki galo, tada produkte (permiate arba retante) beveik nebūna priemaišų.

Membraniniai procesai klasifikuojami pagal jų varos jėgos pobūdį. *Membraninio proceso varos jėga* yra cheminis (krūvio neturinčių dalelių srauto) ir elektrocheminis (krūvį turinčių dalelių srauto) potencialo pokytis. Kadangi šiuos potencialus nustatyti sunku, tai tokių procesų techniniuose skaičiavimuose varos jėga dažnai yra laikomi kiti paprasčiau nustatomi veiksniai, nusakantys proceso greitį. *Baromembraninių* procesų, pvz., atvirkštinio osmoso, nano-, ultra- ir mikrofiltravimo bei pergarinimo per puslaidę membraną, toks veiksnys gali būti slėgio pokytis membranoje; *difuzinių membraninių* procesų, pvz., dializės, išgarinimo pro membraną, membraninio dujų perskyrimo, – koncentracijos skirtumas abipus membranos; *elektromembraninių* procesų, pvz., elektrodializės, elektroosmoso, – elektrinio potencialo pokytis membranoje; *termomembraninių* procesų, pvz., membraninio distiliavimo, – temperatūros pokytis. Kai kurių membraninių procesų varos jėgą gali nusakyti du ar net daugiau veiksnių.

Membranų darbas nusakomas jų atrankumu ir našumu (angl. *flux*) bei separacijos koeficientu. Membranų *atrankumas, arba, kaip anksčiau buvo vadi-*

nama, selektyvumas φ , %, parodo, kokiu laipsniu membrana praleidžia ar sulaiko vieną iš komponentų iš 1 kg mišinio, ir aprašomas tokiu santykiu:

$$\varphi = \frac{c_1 - c_2}{c_1} \cdot 100 = (1 - \frac{c_2}{c_1}) \cdot 100 ; \qquad (24.1)$$

čia c_1 ir c_2 – atitinkamai medžiagos koncentracija pradiniame mišinyje ir produkte.

Separacijos koeficientas parodo mišinio perskyrimo laipsnį, kuris išreiškiamas ne procentais, o vienetais.

Našumas (laidumas) *G*, kg/(m^2·s) arba m^3/(m^2·s), išreiškiamas permiato (filtrato) tūriu arba mase per laiko τ vienetą nuo membranos darbinio paviršiaus ploto *F* vieneto. Kadangi realūs membraniniai procesai vyksta lėtai, tai jų našumas dažniausiai matuojamas kg/(m^2·h) arba m^3/(m^2·h):

$$G = \frac{V}{F \cdot \tau} . \qquad (24.2)$$

24.1. Membranos

Membrana – tai puslaidė kieta arba skysta pertvara, praleidžianti visus (pralaidi) arba tik dalį tam tikrų skystų ar dujinių mišinių komponentų (puslaidė). Pagal kilmę membranos būna gyvulinės, augalinės ir sintetinės – organinės ir neorganinės, pagal struktūrą – porėtos ir neporėtos, pagal mechanines savybes – spūdžios ir nespūdžios. Membranoms keliami tokie reikalavimai: didelis atrankumas ir našumas arba laidumas; cheminis atsparumas terpei; pakankamas mechaninis atsparumas montuojant, transportuojant ir laikant; savybių pastovumas eksploatavimo metu (gali pakisti tik keletu procentų).

Membranų gamybai naudojami įvairūs polimerai (acetilceliuliozė, poliamidai, polisulfonai), keramika, stiklas, metalo folija. Polimerinės membranos gali būti porėtos (*porous*) ir neporėtos (*dense*), arba difuzinės.

Porėtosios membranos plačiai naudojamos atvirkštinio osmoso, mikro- ir ultrafiltravimo, pergarinimo, rečiau – dujų perskyrimo procesuose. Jos turi tiek anizotropinę, tiek izotropinę struktūrą. Anizotropinės struktūros membranų storis gali kisti nuo 10...20 nm iki 10 μm ir daugiau. Šis sluoksnis vadinamas aktyviuoju, selektyviuoju arba atrankiuoju. Jis sudaro vadinamąjį selektyvumo barjerą. Mišinio komponentai perskiriami būtent šiuo sluoksniu, esančiu skiriamojo mišinio pusėje. Po aktyviuoju sluoksniu yra nuo 100 iki 200 μm storio stambių porų sluoksnis (nešiklio arba pagrindo sluoksnis). Šio sluoksnio storis gali būti ir didesnis, net iki keleto milimetrų. Nešiklio sluoksnis, esantis po aktyviuoju sluoksniu, padidina membranos mechaninį atsparumą. Anizotropinės struktūros membranos pasižymi dideliu pralaidumu, eksploatuojant lėčiau užsikemša jų poros. Šių membranų naudojimo trukmė nu-

sakoma membranos medžiagos cheminiu atsparumu darbinėse terpėse. Izotropinės struktūros membranoms būdingas greitas laidumo sumažėjimas dėl porų užsikimšimo koloidinėmis arba mišiniuose pakibusiomis (suspenduotomis) dalelėmis.

Difuzinės, arba neporėtos, membranos naudojamos dializėje dujų ir skysčių mišiniams perskirti išgarinant juos pro membraną. Paprastai jos būna neporėtos. Tai kvazidifuziniai geliai. Taip pat tai gali būti metalo pagrindo ar keraminės membranos, bet tuo atveju dėl koncentracijos gradiento pokyčio tirpiklis ir ištirpusi medžiaga teka pro kristalinę ar metalinę gardelę (molekulinė difuzija).

Proceso greitis priklauso nuo prasiskverbiančių dalelių ir membranos medžiagos tarpusavio aktyvacijos energijos, nuo membranos matricos atskirų dalių judrumo ir difunduojančiųjų komponentų savybių. Difuzijos greitis tuo didesnis, kuo silpnesni polimerinės grandinės grandžių tarpusavio ryšiai gelio sluoksnyje, t. y. kuo labiau brinksta membrana. Dėl to difuzinių membranų gamybai geriausiai tinka liofilinės medžiagos.

Molekulių difuzijos greitis proporcingas difuzijos koeficientui, kuris priklauso nuo molekulių dydžio ir formos, todėl difuzines membranas geriausia naudoti vienodų savybių, bet skirtingos formos ir dydžio komponentams perskirti. Difuzinių membranų laidumas senstant beveik nekinta. Dėl didelio hidrodinaminio pasipriešinimo jas geriau naudoti ultraplonų plėvelių, pritvirtintų prie porėto pagrindo, pavidalu.

Porėtosios ir difuzinės membranos gaminamos lakštų, vamzdelių formos arba tuščiavidurio pluošto (skersmuo 20...100 μm, sienelės storis 10...50 μm) pavidalo.

Puslaidėse membranose esančios poros pagal skersmens dydį sąlygiškai skirstomos į mikroporas (jų spindulys $r < 10^{-9}$ m), pereinamąsias poras, arba mezoporas ($10^{-9} < r < 10^{-7}$), ir makroporas ($r > 10^{-7}$ m).

24.1.1. Sutankinamosios membranos

Sutankinamosios membranos – tai tokios membranos, kurios, veikiamos slėgio ar kitų veiksnių, sutankėja. Jos yra plastiškos, todėl aparatus paprasčiau sandarinti. Plačiausiai naudojamos iš liofilinių medžiagų pagamintos labai laidžios sutankinamosios membranos.

Anizotropinės struktūros membranos. Jos gaminamos iš polimerų tirpalų su priedais, pašalinant tirpiklį.

Lakštinės, arba plėvelinės, puslaidės membranos gaminamos sausuoju, arba spontaniniu, šlapiuoju, arba koaguliaciniu, ir terminiu būdais. Gaminant sausuoju būdu, polimeras, pvz., celiuliozės eterių mišinys, tirpinamas tirpiklyje (pvz., acetone) ir į šį tirpalą dedama poriklių: etanolio, butanolio, vandens

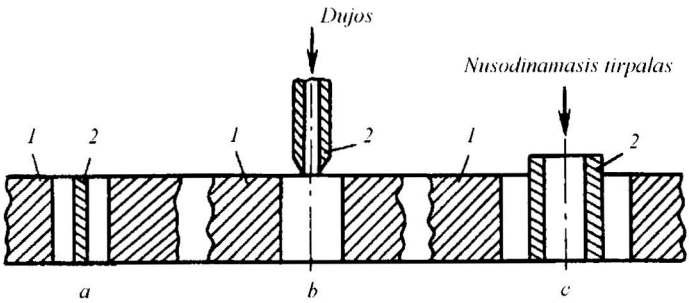
ar glicerolio. Membranų porėtumas reguliuojamas keičiant tirpalų koncentraciją ir garinimo sąlygas, pridedant druskų ar kitų medžiagų.

Gaminant membranas šlapiuoju būdu, jas sudarysianti medžiaga (pvz., acetilceliuliozė), tirpiklis (pvz., acetonas ir vanduo) ir poriklis (pvz., magnio perchloratas, kartais formamidas) plonu sluoksniu paskleidžiami ant horizontalaus paviršiaus, keletą minučių džiovinami ir susidariusi plėvelė valandai pamerkiama į šaltą (apie 0 °C) vandenį, kad atsisluoksniuotų. Pradinėje stadijoje nuo polimero paviršiaus acetonas greitai išgaruoja ir susidaro gelio pavidalo sluoksnis, trukdantis tirpikliui pasišalinti iš gilesnių sluoksnių. Vėliau šis sluoksnis tampa aktyvus ir tuo plonesnis, kuo ilgiau garuoja tirpiklis. Pabaigoje plėvelė apdorojama karštu vandeniu, kad iš jos išsiplautų tirpiklis ir poriklis.

Termiškai gaminant membranas, sudaromi polimero mišinio ir plastifikatorių (pvz., poliglikolių) geliai. Komponentai sumaišomi, išlydomi ir atšaldomi. Gaunami terminiai geliai. Mažinant lydalo temperatūrą, polimero makromolekulės suformuoja gelinę struktūrą, dėl fazių skirtumo susidaro poros.

Be šių trijų pagrindinių plėvelinių membranų gamybos būdų, naudojamas ir pramoninių plėvelių modifikavimas, įterpiant į jas hidrofilines grupes. Gaunamas liofiliškesnis polimeras, padidėja vandens sorbcija ir polimeras gali išbrinkti iki gelio būsenos.

Tuščiavidurio pluošto membranos gaminamos šiais būdais: sausuoju, sausai šlapiu, šlapiuoju ir formavimu iš lydalo. Tuščiavidurio pluošto membranos sausuoju būdu formuojamos praleidžiant tirpalą pro filjeres (plokšteles, turinčias mikroplyšelių), šalinant tirpiklį ore arba inertinių dujų sraute. Kanalui pluošte suformuoti, naudojamos filjerės su adatomis, pritvirtintomis jų angos centre (24.2 pav., *a*). Vietoj adatos kartais naudojamas kapiliaras (24.2 pav., *b*), pro kurį tiekiamos suslėgtos dujos.

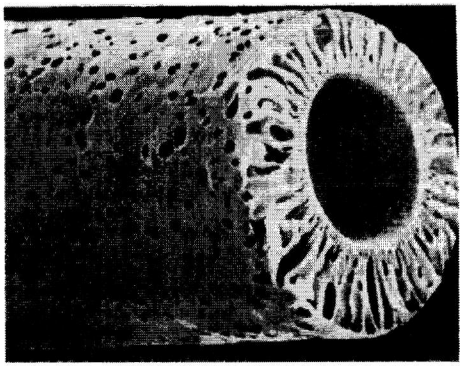


24.2 pav. Tuščiavidurio pluošto formavimo filjerių schema: *a* – filjerė (*1*) su adata (*2*); *b* – filjerė (*1*) su tuščiavidure adata (*2*) dujoms tiekti; *c* – filjerė (*1*) su tuščiavidure adata (*2*) nusodinamajam tirpalui tiekti

Sausai šlapias būdas nuo sausojo skiriasi tuo, kad po tirpiklio pašalinimo ore polimeras nusodinamas vandenyje arba kitame skystyje, pašalinant tirpiklį ir formuojant aktyvųjį sluoksnį.

Šlapiuoju būdu pluoštas formuojamas nusodinimo vonioje, negarinant tirpiklio ore. Čia į tuščiavidurį pluoštą pro adatą ar kapiliarą tiekiamas nusodinamasis tirpalas; paprastai tai būna vanduo (24.2 pav., *c*).

Formuojant pluoštą iš lydalo, naudojamas polimero lydalas su įvairiais priedais. Per filjeres suformuotas pluoštas toliau perdirbamas sausuoju arba sausai šlapiu būdu. Formuojant šiuo būdu, naudojamos paprastesnės konstrukcijos filjerės.



24.3 pav. Tuščiavidurio pluošto mikronuotrauka. Centrinės angos skersmuo apie 0,2 mm. Skysčio srautas teka iš išorės į pluošto vidų. Dažniausiai naudojama tokio pluošto gniūžtė

Izotropinės struktūros membranos. Šios membranos gaunamos plonas polimerines plėveles atsargiai tempiant visomis kryptimis, kol susiformuoja poros; švitinant radioaktyviosiomis dalelėmis arba elektromagnetiniais spinduliais, po to ėsdinant cheminiais reagentais. Dėl to jos vadinamos branduolinėmis membranomis arba membranomis su nuklono dydžio poromis.

Radioaktyviosios arba elektromagnetinės dalelės paveiktoje vietoje polimero molekulinė masė tampa gerokai mažesnė negu nepaveiktose vietose. Dėl to padidėja tos polimero vietos jautrumas cheminiam poveikiui. Chemiškai ėsdinant šarmu ar rūgštimi, susiformuoja beveik vienodo skersmens skersinės poros. Dabar galima gauti branduolines membranas, kurių porų skersmuo yra nuo kelių nanometrų iki kelių dešimčių mikrometrų. Šių membranų storis kinta nuo vieno iki kelių mikrometrų (paprastai apie 1 μm).

Branduolinių membranų pranašumai: porų skersmens nuokrypis nuo nominaliosios vertės neviršija 10 %; taisyklinga, apvali skerspjūvio forma; galima gauti membranas su norimu kiekiu norimo skersmens porų; galima naudo-

ti medžiagas, atsparias agresyvioms terpėms; biologinis pasyvumas; atsparumas bakterijų poveikiui; atsparumas terminiam ir cheminiam poveikiui.

Dėl to branduolinės membranos tinka mikroanalizei (citologijoje ir elementų analizėje), stambiamolekulių junginių tirpalams frakcionuoti ir valyti. Jos sėkmingai naudojamos bakterijoms iš vandens šalinti lauko sąlygomis, įvairių tipų kraujo ląstelių dydžiui ir sandarai tirti (vėžinėms ląstelėms išskirti iš kraujo).

24.1.2. Kietos struktūros membranos

Prie kietos struktūros membranų priskiriamos metalinės ir keraminės membranos, porėtojo stiklo, padengtosios, dinamiškosios membranos ir t. t.

Metalinės membranos gaminamos:

- demineralizuojant arba sublimuojant vieną iš lydalo komponentų. Joms būdingas didelis porėtumas ir labai siauras porų pasiskirstymas pagal dydį. Tokių membranų porų dydis 0,1...6 μm; prireikus jas galima dar sumažinti, membranoms gaminti naudojant metalinę foliją;
- sukepinant metalo miltelius aukštoje temperatūroje. Porų dydis – nuo kelių mikrometrų iki dešimtųjų ar šimtųjų mikrometro dalių.

Metalinių membranų pranašumai: vienoda porų struktūra ir dydis; atsparumas bakterijų poveikiui; cheminis atsparumas įvairiose terpėse. Jas galima valyti atgaline vandens ar kito skysčio srove arba kaitinant.

Keraminės membranos dažniausiai būna dvisluoksnės arba trisluoksnės (kompozicinės). Pagrindo porų dydis 3,0...15 μm. Ant jo klojamas membraninis keleto mikrometrų storio sluoksnis (*Al, Ti, Zr* oksidai). Paprastai keraminės membranos elementas gaminamas virbalo pavidalo (dažniausiai šešiakampio, kurio skersmuo gali kisti nuo kelių (kapiliarai) iki kelių dešimčių, pvz., 40, milimetrų). Dažnai naudojamo 10 mm skersmens 0,7...1 m ilgio virbalo viduje darbiniam paviršiui padidinti daromos išilginės angos – tuščiaviduriai 4...6 mm skersmens cilindrai, kurių vidinis paviršius padengiamas atrankiaisiais sluoksniais, dažniausiai zolių ir gelių arba kietosios fazės (metalų oksidai plius įvairūs priedai) nusodinimu ant pagrindo. Keraminės membranos naudojamos mikro- ir ultrafiltravimo procesuose, taip pat agresyvioms terpėms perskirti ir valyti įvairiose temperatūrose, tarp jų ir aukštose.

Porėtojo stiklo membranoms būdingas didelis cheminis atsparumas ir struktūros kietumas, jų neveikia mikroorganizmai. Jas galima naudoti plataus *pH* verčių intervalo (1...10) tirpalams perskirti.

Gaminamos plokštelių, vamzdelių, kapiliarų, tuščiavidurio pluošto pavidalo membranos. Jas galima sterilizuoti termiškai ir chemiškai.

Kapiliarinių porėtojo stiklo membranų gamybos technologija paremta kapiliarų iš šarminio boro silikatinio stiklo formavimu, apdorojimu rūgštimis, siekiant pašalinti iš stiklo masės vieną sudedamųjų dalių. Keičiant terminio ir

cheminio apdirbimo režimus, galima gauti įvairaus porėtumo (su 2,0...100 nm dydžio poromis) membranas.

Padengtosios membranos priklausomai nuo gamybos būdo skirstomos į įmirkomąsias ir užpurškiamąsias. Gaminant *įmirkomąsias membranas*, kaip porėtasis pagrindas naudojamas porėtas nerūdijantysis plienas arba kermetinės (sitalinės) pertvaros. Poras mažinančios medžiagos – netirpios druskos, kurios susidaro porų paviršiuje reaguojant specialiai parinktiems druskų tirpalams. Porėtasis pagrindas keletą parų mirkomas sočiajame kokios nors druskos (pvz., $CuSO_4$) tirpale ir išdžiovinamas. Po to jis parą laikomas tokios druskos (pvz., $K_4[Fe(CN)]_6$) tirpale, kad reakcijos metu susidarytų netirpios nuosėdos (šiuo atveju vario heksaciano feratas).

Užpurškiamosios membranos gaunamos pagrindo makroporas (rečiau mezaporas) užpurškiant įvairiomis medžiagomis (iš tirpalų ar polimerų bei metalų lydalų), galinčiomis prikibti prie pagrindo medžiagos. Keičiant užpurškiamo sluoksnio storį, galima kryptingai reguliuoti membranų porų dydį. Užpurškiamosios membranos pavyzdžiu gali būti organinių junginių (akrilonitrido, kumolo, etilbenzeno, piridino, dichloretano ir daugelio kitų) plazminės polimerizacijos būdu ir po to einančiu polimerų nusodinimu ant porėtojo pagrindo pagamintos membranos.

Plazmine sinteze gaunamos sausos membranos, todėl jas lengviau transportuoti ir laikyti. Polimerizacijos metu galima reguliuoti membranos polimerizuoto, t. y. aktyvaus, sluoksnio storį, naudoti daug polimerų, nusodinti aktyvųjį sluoksnį ant įvairių formų ir medžiagų pagrindo. Šios membranos palyginti greitai pagaminamos. Kai kurių šalių literatūroje šis metodas vadinamas *CVD* padengimo metodu. *CVD* metodu labai sunku užpurkšti membranas ant vamzdinių paviršių.

Dinamiškosios membranos gaunamos pro porėtąjį pagrindą filtruojant tirpalą su specialiais dispersinių medžiagų priedais. Porėtasis pagrindas, kurio porų nominalusis skersmuo yra nuo mikrono dalių iki 5 μm, negali sulaikyti ištirpusių mažamolekulių junginių molekulių ir jonų. Dėl dispersinių dalelių sorbcijos pagrindo pusėje, kur tiekiamas tirpalas, susidaro puslaidis sluoksnis.

Šios membranos gali būti naudojamos dideliuose įrenginiuose, pvz., pramoninėms nuotekoms valyti. Jų pranašumai yra aparatų gamybos paprastumas: reikia tik parinkti porėtojo pagrindo tvirtinimo ir sandarinimo būdus; aparatas gali būti pagamintas kaip vamzdinis šilumokaitis, turintis mažo skersmens porėtų vamzdelių ir didelį membranos darbinį paviršių; didelis savitasis našumas, siekiantis šimtus litrų pro kvadratinį metrą per valandą; beveik neribota naudojimo trukmė: jos veikia, kol perskiriamajame tirpale yra bent mikrokiekiai (0,1...10 mg/l) medžiagų; mechaniškai pažeista membrana pati atsigamina, sudarydama naują puslaidį sluoksnį; jei eksploatavimo metu sumažėja pralaidumas, jį galima atkurti nuplaunant sorbcinį sluoksnį tirpikliais, tiekiamais iš kitos pagrindo pusės.

Dinamiškosios membranos naudojamos silpnai mineralizuotoms nuotekoms ir gamtiniam vandeniui valyti, vandeniniams tirpalams koncentruoti. Perspektyvu jas naudoti nutekamiesiems vandenims, turintiems daugiavalenčių katijonų, koloidinių dalelių, valyti, rūgštiems gamtiniams vandenims valyti, kai jų nereikia labai gėlinti. Dažnai jomis iš vandens išvalomi visi mikroorganizmai ir jis tampa tinkamas naudoti pramonėje ir buityje.

24.1.3. Skystosios membranos

Skystosiose membranose didžiausią pasipriešinimą medžiagos pernašai sudaro šios medžiagos difuzija pro skystą plėvelę, kuri gaunama šiais būdais: 1) plona skysta plėvelė susidaro laisvai arba separatoriaus sienelės ar sieto, skiriančio du tirpalus, ertmėse; 2) plonas skysčio sluoksnis (arba plėvelė) susidaro tarp dviejų lygiagrečių polimerinių plėvelių; 3) skysta plėvelė susijungia su pagrindo medžiaga ir užkemša jos poras; 4) „membraninis" skystis apgaubia skysčio lašelius (dispersinė fazė), pasiskirsčiusius kitame skystyje (dispersijos terpe), t. y. sistema tampa emulsija.

Pirmaisiais dviem būdais gautų skystų membranų paviršius būna palyginti nedidelis (apie 10 m^2 viename aparato kubiniame metre), ketvirtuoju būdu gautų membranų paviršius būna didžiausiais (keletas tūkstančių kvadratinių metrų viename aparato kubiniame metre). Todėl pramonėje perspektyviausios yra skystosios membranos emulsinėje sistemoje. Skystosios membranos gali efektyviai perskirti tiek vandenines, tiek nevandenines sistemas. Jos taikomos sunkiųjų metalų jonams, fenoliui, amoniakui ir kitiems junginiams išskirti iš tirpalų.

Medžiaga, tekanti pro skystąją membraną, joje ištirpsta, difunduoja pro ją ir po to patenka į kitą skystąją fazę. Kuo membrana plonesnė, tuo greičiau pernešama medžiaga.

Pramonėje dažnai susiduriama su tepalo emulsija vandenyje ir vandens emulsija tepale. Šiai sistemai stabilizuoti naudojamos paviršinio aktyvumo medžiagos – emulgatoriai, kurie dažnai būna nejonogeninio pobūdžio. Paviršiaus įtempis tarp dviejų nesimaišančių skysčių palengvina emulsijos susidarymą. Emulgatoriai turi saveikauti tiek su vandeniu, tiek su tepalu, t. y juos turi sudaryti amfoterinės molekulės, kurių viena dalis (hidrofilinė) turi polinę struktūrą, o kita (hidrofobinė) – nepolinę. Hidrofilinė molekulės dalis yra vandenyje, o hidrofobinė – tepale. Mechaniškai apdorojant sistemą, pvz., maišant, didesnio paviršiaus įtempio fazė tampa disperguota, o mažesnio paviršiaus įtempio fazė sudaro dispersijos terpę.

Skystosios membranos gali būti panaudotos skysčių ekstraktoriuose, pvz., purkštuvinėse kolonose arba rotoriniame-diskiniame ekstraktoriuje. Norint iš dispersinės fazės išskirti perneštąją medžiagą, emulsija suardoma terminiu arba elektrostatiniu būdu.

24.2. Fizikiniai cheminiai membraninių procesų pagrindai

Kol kas bendro membraninių procesų mechanizmo nėra sukurta, todėl kiekvienas membraninis procesas nagrinėjamas atskirai, nes šių procesų mechanizmai gali gerokai skirtis.

Tiriant ir analizuojant membraninių procesų mechanizmus, būtina atkreipti dėmesį į tris pagrindinius veiksnius: 1) membranos struktūrą pagal storį (porėta, neporėta, izotropinė); 2) perskiriamosios sistemos fizikines chemines savybes (ypač termodinamines); 3) perskiriamojo tirpalo ir membranos medžiagos sąveiką. Neįvertinus bent vieno iš šių veiksnių, galima gauti klaidingą nagrinėjamojo membraninio proceso mechanizmo modelį.

Perskiriamosios medžiagos ir polimerų membranos sąveikos jėgų dydis kinta plačiame intervale. Silpnos sąveikos jėgos, kurias daugiausia nusako difuzija, gaunamos, pvz., pro membranas skverbiantis dujoms. Tuo paaiškinamas nedidelis įvairių dujų skverbties pro to paties tipo polimerines membranas greičių skirtumas. Skverbties pro skirtingų savybių polimerus greitis gali skirtis 10^5 kartų. Toks didelis skirtumas aiškinamas polimerų grandinių, kurios priklauso nuo molekulių dydžio ir poliškumo, judrumu ir lankstumu.

Didelę įtaką perskiriamųjų medžiagų pernašai per membraną turi tirpiklių, pvz., vandens, struktūrinės savybės ir jų poveikis membranai. Vandenyje yra vandeniliniais ryšiais susijusių molekulių grupių, sudarytų iš šimtų molekulių. Tokių molekulių grupių patvarumas priklauso ne tik nuo temperatūros, bet ir nuo ištirpusių medžiagų kilmės, fizinių ir cheminių membranos savybių.

Hidrofobinės membranos stengiasi atstumti vandens molekules; vidutinio poliškumo grupės (COO^-, NH_2^-, OH^-) ardo vandenilinius ryšius molekulių grupėse, todėl pro membraną prateka daugiau vandens. Hidrofilinėse (acetilceliuliozinėse) membranose didelė vandens dalis esti sujungta ir iki -80 °C neužšąla. Kapiliarinis vanduo iš membranos pasišalina lengviau, jis gali solvatuoti druskų jonus ir pernešti juos per membraną. Polimero molekulę solvatavęs vanduo būna nejudrus, jis uždaro membranos poras ir negali solvatuoti ištirpusių druskų jonų. Tai labai svarbu aiškinant membranos atrankumą. Didinant membranos hidrofiliškumą ir atsižvelgiant į vandens, kaip tirpiklio, prasiskverbiančio pro membraną, vaidmenį, galima didinti membranų atrankumą ir pralaidumą. Polimerinių membranų hidrofiliškumą galima didinti didinant hidrofilinių ir mažinant hidrofobinių polimero, iš kurio pagaminta membrana, makromolekulių grupių skaičių.

Skysčio ir kietojo kūno sąlyčio vietoje veikia paviršinės jėgos (adhezija, paviršiaus įtempis, molekulinė trauka). Su membranos medžiaga sujungto kraštinio skysčio sluoksnio, savybės (klampa, dielektrinė skverbtis) gali skirtis nuo likusio skysčio savybių. Skysčių mišinių paviršinių sluoksnių sudėtis yra kitokia nei tūrio viduje ir tai turi įtakos perskiriant organinių medžiagų mišinius.

Kintant tirpalo paviršinio sluoksnio sudėčiai ir struktūrai, jo kai kurių fizikinių cheminių savybių (pvz., klampos, dialektrinės skverbties) vertės yra kitokios nei tų pačių savybių vertės tirpalo viduje. Vandens dialektrinės skverbties sumažėjimas rodo vandens molekulių judrumo sumažėjimą, o tai sumažina sujungto vandens gebą tirpinti. Ar keičiasi nepoliškų skysčių pakraščio sluoksnio savybės, nepastebėta.

24.2.1. Baromembraniniai procesai

Baromembraninių procesų varos jėga yra slėgių skirtumas abipus membranos. Jiems priskiriami molekulinė separacija, atvirkštinis osmosas, nano-, ultra- ir mikrofiltravimas. 24.1 lentelėje pateiktos baromembraninių procesų naudojimo sąlygos.

24.1 lentelė. Baromembraninių procesų skirstymas

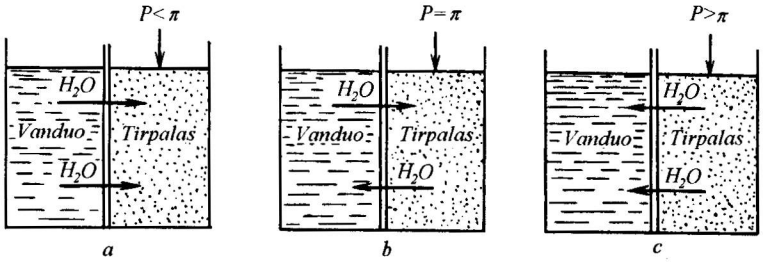
Procesas	Atvirkštinis osmosas, dializė, molekulinė separacija	Nanofiltravimas	Ultrafiltravimas	Mikrofiltravimas	Filtravimas
Dalelių dydis, μm	0,0001...0,003	0,001...0,005	0,005...0,05	0,05...10,0	> 10,0
	Ištirpusios medžiagos, jonai, molekulės	Makromolekulės, virusai	Labai mažos dalelės	Mažos dalelės	Didelės dalelės

Atvirkštinis osmosas yra procesas, atvirkščias natūraliam osmosiniam procesui. Osmosas – tai natūrali, arba savaiminė, tirpalo tėkmė pro puslaidę membraną iš mažesnės koncentracijos pusės į didesnės koncentracijos pusę (24.4 pav., *a*). Jį sukelia osmosinis slėgis, kuris priklauso nuo tirpalo tipo, ištirpusios medžiagos ir jos koncentracijos. Kai osmosinis slėgis abiejose pusėse susilygina (24.4 pav., *b*), susidaro osmosinė pusiausvyra ir tirpalas tekėti negali. Slėgis, kuriam esant susidaro pusiausvyra, vadinamas osmosiniu slėgiu. Kai didesnis slėgis sudaromas didesnės koncentracijos tirpalo pusėje, atsiranda atgalinis tekėjimas. Tada tirpalas teka iš didesnės koncentracijos pusės į mažesnės koncentracijos pusę. Šis procesas vadinamas atvirkštiniu osmosu (24.4 pav., *c*).

Tirpalų osmosinis slėgis gali siekti dešimtis megapaskalių. Darbinis slėgis atvirkštinio osmoso įrenginiuose turi būti gerokai didesnis, nes jų našumas priklauso nuo proceso varos jėgos – darbinio ir osmosinio slėgių skirtumo. Atvirkštinio osmoso varos jėga ΔP idealiai atrankios arba selektyvios membranos atveju (kai $\varphi = 100$ %) išreiškiama lygtimi:

$$\Delta P = P - \pi_3 ; \qquad (24.3)$$

čia P – darbinis slėgis; π_3 – osmosinis pradinio tirpalo slėgis prie membranos paviršiaus.



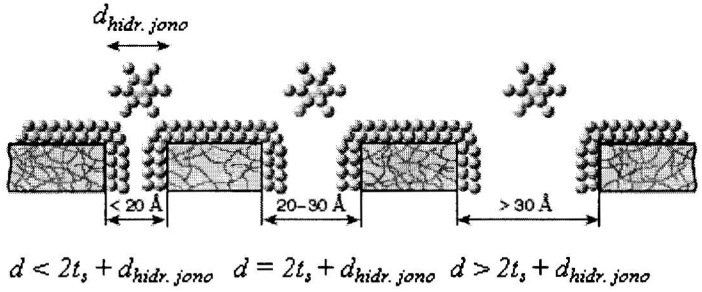
24.4 pav. Masės pernešimo osmosu per membraną schema

Kadangi membranos nėra idealiai atrankios arba selektyvios ir tam tikras ištirpusios medžiagos kiekis prateka pro jas, proceso varos jėga

$$\Delta P = P - (\pi_3 - \pi_2) = P - \Delta\pi ; \qquad (24.4)$$

čia π_2 – osmosinis produkto slėgis.

Kadangi pradinio tirpalo slėgį π_3 prie membranos nustatyti sunku, jis prilyginamas pradinio tirpalo osmosiniam slėgiui π_1, t. y. $\pi_3 \approx \pi_1$.



24.5 pav. Membranų laidumo aiškinimas

Pagal selektyviosios skverbties kapiliarinės filtracijos modelį į elektrolito tirpalą panardintos liofilinės membranos paviršiuje ir porų viduje (24.5 pav.) susidaro t_s storio paviršinis sujungto vandens sluoksnis, kuris nedalyvauja tirpinimo procese ir neprateka pro membraną, nes sujungto vandens tirpinamoji geba sumažėja. Jonai arba molekulės, kurių netirpina membranų porose

sujungtas vanduo, pro membraną neprasiskverbia. Kuo storesnis šis sluoksnis ir kuo didesnis hidratuotas jonas, tuo atrankesnė, arba selektyvesnė, yra membrana. Remiantis tyrimais nustatyta, kad atvirkštiniam osmosui naudojamų membranų medžiaga turi būti liofilinė, t. y. porų skersmuo (25.5 pav.) neturi viršyti dvigubo sujungto vandens sluoksnio storio ir hidratuoto katijono skersmens sumos ($d \leq 2t_s + d_{hidr.jono}$); hidrauliniam pasipriešinimui sumažinti tikslinga gaminti anizotropinės struktūros membranas arba kompozicines membranas su plonu aktyviuoju sluoksniu.

Visų membranų, kai darbo slėgiai viršija osmosinį, atrankumas susijęs su jonų hidratacijos šiluma. Minėto ryšio lygtys nurodomos platesniuose atvirkštinio osmoso aprašymuose.

Ultra- ir mikrofiltravimas yra stambiamolekulių ir smulkiamolekulių junginių tirpalų perskyrimo, taip pat jų frakcionavimo ir koncentravimo procesas. Jis vyksta esant slėgių skirtumui abipus membranos, panašiai kaip paprasto filtravimo metu.

Ultrafiltravimas, skirtingai nuo atvirkštinio osmoso, naudojamas sistemose, kuriose ištirpusio komponento molekulinė masė daug didesnė už tirpiklio molekulinę masę.

Kadangi stambiamolekulių junginių osmosinis slėgis mažas (neviršija dešimtųjų megapaskalio dalių), todėl, skaičiuojant ultrafiltravimo proceso varos jėgą, į jį neatsižvelgiama. Ultrafiltruojama 0,2...1,0 MPa slėgyje. Jeigu ultrafiltruojami gana didelės koncentracijos tirpalai arba jeigu sulaikoma medžiaga susikaupia ant membranos, tai, skaičiuojant proceso varos jėgą, reikia atsižvelgti į stambiamolekulių medžiagų tirpalų osmosinį slėgį prie membranos paviršiaus ((24.4) lygtis).

Mikrofiltravimas (membraninis filtravimas) naudojamas išskirti iš tirpalo koloidinėms arba suspenduotoms 0,1...10 μm dydžio mikrodalelėms, esant nedideliam (dešimtųjų ir net šimtųjų megapaskalio dalių) slėgiui. Šis procesas užima tarpinę vietą tarp ultrafiltravimo ir paprastojo filtravimo. Jis plačiai naudojamas elektronikos, medicinos, chemijos, mikrobiologijos pramonėje jautrioms suspensijoms koncentruoti, įvairiems tirpalams šviesinti (pakibusioms dalelėms šalinti), nutekamiesiems ir gamtiniams vandenims valyti, tirpalams ruošti atvirkštiniam osmosui, nano- ir ultrafiltravimui.

Baromembraninius procesus pagal skiriamųjų dalelių dydį sąlygiškai galima suskirstyti taip:

Procesas	Atvirkštinis osmosas	Nano-filtravimas	Ultra-filtravimas	Mikro-filtravimas
Dalelių skersmuo, μm	0,0001...0,003	0,001...0,005	0,005...0,05	0,05...10,0

Nanofiltravimas užima tarpinę padėtį tarp atvirkštinio osmoso ir ultrafiltravimo ir naudojamas koncentruoti ir perskirti medžiagoms, kurių molekulės masė yra nuo 300 iki 3000, taip pat sunkiųjų metalų jonams perskirti ir koncentruoti.

Šie procesai priklauso nuo paviršinių reiškinių, vykstančių membranos ir tirpalo riboje. Kai poros yra 100...200 nm ir mažesnės, gerokai padidėja vandens klampa, sumažėja jo judrumas, o hidrofobinių tirpiklių (benzeno, anglies tetrachlorido) judrumas nesikeičia ir toks skystis teka kaip paprastas niutoninis skystis.

Diafiltravimas – baromembraninio proceso (dažniausiai ultrafiltravimo) taikymo perskirti skysčių mišiniams atvejis, kai membranos atrankumas pagal atskirus mišinio komponentus gerokai skiriasi. Diafiltravimo metu tirpalas papildomas tirpiklio kiekiu, lygiu išleidžiamam permiato kiekiui. Membranos nesulaikomas tirpalo komponentas *NS* su tirpikliu pereina į produktą ir šitaip aparate valomas komponentas *S*, membrana turi didesnį atrankumą. Diafiltravimu tirpalo komponentus galima visiškai perskirti. Ultrafiltravimo atveju, naudojant tokią pat arba artimų savybių membraną, komponento *S* koncentracija pradiniame tirpale padidėtų, o komponento *NS* – išliktų nepakitusi.

Diafiltravimas baromembraninių procesų metodais nesukelia fizinių ir cheminių pokyčių ir atliekamas neaukštose temperatūrose. Tai leidžia išvalyti išoriniams poveikiams jautrių medžiagų tirpalus, nepabloginant produkcijos kokybės, taip pat supaprastina technologines schemas, atpigina valymo procesą.

Pramonėje dažnai reikia išskirti praskiestus elektrolitus, turinčius panašių savybių jonus. Norimam elektrolitui išskirti iš daugiakomponenčio tirpalo naudojamas kombinuotas metodas, jungiantis kompleksonometriją ir ultrafiltravimą. Metodo esmė tokia: iš elektrolito išskiriami jonai su į perskiriamąjį tirpalą supiltu stambiamolekuliu polielektrolitu (vadinamuoju kompleksadariu) susijungia į junginius – polimerinius kompleksus. Susidariusieji kompleksai būna daug didesni už nesujungtus jonus. Pastarieji kartu su tirpikliu prateka pro membraną ir sudaro permiatą, o polimerinis kompleksas pasilieka retante. Jis naudojamas brangiųjų metalų jonams išskirti. Šio metodo pranašumas – didelis kompleksus sudarančių priedų pasirinkimas ir našumas, esant nedidelėms energijos sąnaudoms, nepertraukiamas režimas, kurį galima automatizuoti.

24.2.2. Difuziniai membraniniai procesai

Šių procesų varos jėga dažniausiai yra koncentracijos arba slėgio pokytis membranoje, o ribojančioji proceso stadija yra difuzija. Jie taikomi dujiniams ir skystiems mišiniams perskirti.

Membraninis dujų perskyrimas – tai mišinio komponentų perskyrimas arba jo prisodrinimas kurio nors komponento. Naudojant porėtąsias membranas su 0,005...0,03 μm dydžio poromis, būtina, kad molekulės laisvojo kelio

ilgis būtų didesnis už membranos poras, t. y. molekulių susidūrimų su poros sienelėmis dažnis būtų didesnis už molekulių tarpusavio susidūrimų dažnį. Kadangi pagal dujų kinetinę teoriją vidutiniai dujinių molekulių greičiai atvirkščiai proporcingi jų masės kvadratinei šakniai, tai komponentai pro membraną skverbiasi skirtingais greičiais. Permiate daugėja mažesnės molekulinės masės komponento, o retante arba koncentrate – didesnės molekulinės masės komponento. Mišinio perskyrimo koeficientas apskaičiuojamas pagal tokią lygtį:

$$K = \frac{n_1}{n_2} = \left(\frac{M_2}{M_1}\right)^{0,5}; \qquad (24.5)$$

čia n_1 ir n_2 – komponentų molių skaičius; M_1 ir M_2 – jų santykinės molinės masės

Realiomis sąlygomis dėl dujų adsorbcijos ir kondensacijos membranose su makroporomis šis koeficientas gaunamas mažesnis už apskaičiuotąjį. Skysčiams perskirti šis parametras netaikomas. Knudseno, arba perskyrimo, koeficientas labai plačiai taikomas mezoporinėms ir mikroporinėms membranoms apibūdinti. Jei atrankumas, arba selektyvumas, yra mažesnis nei Knudseno koeficientas, tai laikoma, kad membranos turi defektų arba makroporų.

Naudojant neporėtas membranas, dujos perskiriamos dėl skirtingų komponentų difuzijos greičių. Tokių membranų laidumas 2...3 kartus mažesnis nei porėtųjų, tačiau jų atrankumas didesnis. Dujų skverbimosi pro neporėtą polimerinę membraną proceso stadijos yra: dujų sorbcija ant membranos perskiriamojo mišinio pusėje; dujų difuzija pro membraną; dujų desorbcija kitoje membranos pusėje.

Paprastai šį procesą riboja antroji stadija – dujų difuzija pro membraną. Ji išreiškiama pirmuoju Fiko dėsniu:

$$G = -D \cdot \frac{dc}{dx} \cdot F; \qquad (24.6)$$

čia x – membranos storis; c – komponento mišinyje koncentracija; D – difuzijos koeficientas; F – membranos plotas.

Integruojant šią lygtį gaunama, kad pro membraną praėjusių dujų kiekis G proporcingas difuzijos koeficientui D, membranos plotui F, koncentracijos skirtumui ir atvirkščiai proporcingas membranos storiui δ:

$$G = D \cdot \frac{c_1 - c_2}{\delta} \cdot F. \qquad (24.7)$$

Koncentracijas c_1 ir c_2 sunku nustatyti, todėl jos pakeičiamos slėgiu, o difuzijos koeficientas – laidumo koeficientu:

$$G = A \cdot \frac{P_1 - P_2}{\delta} \cdot F ; \qquad (24.7a)$$

čia A – laidumo koeficientas. $A = D \cdot s$. Jo vertė gali būti parenkama žinynuose; s – dujų tirpumas. Jo vertė atvirkščiai proporcinga Henrio konstantai.

Grynų dujų difuzija pro porėtąsias membranas gerai sutampa su jų difuzija mišiniuose, todėl gali būti naudojama parenkant membranų medžiagas.

Realūs atskirų dujų ir jų mišinių procesai mikroporėse membranose nebūtinai turi sutapti, nes vienas komponentas gali būti blokuojamas adsorbcijos ir sunkiau praleidžiamas nei kiti komponentai.

Didinant temperatūrą neporėtų membranų savitasis našumas G didėja, bet kartu mažėja jų atrankumas.

Dujoms perskirti naudojamos polimerinės plėvelės ir tuščiaviduris pluoštas, o aparatai tinka tokie pat, kaip ir skysčiams perskirti.

Membraninis dujų perskyrimas porėtosiomis membranomis naudojamas uranui sodrinti; radioaktyviajam kriptonui iš oro šalinti; heliui iš gamtinių dujų gauti ir kt.

Membraninis dujų perskyrimas neporėtomis membranomis naudojamas vandeniliui išskirti iš dujų gaminant amoniaką (dažniausiai naudojamos paladžio lydinių metalinės membranos), orui sodrinti deguonimi, dujų terpei reguliuoti daržovių saugojimo kamerose, vandeniliui, amoniakui ir heliui išskirti iš gamtinių bei technologinių dujų, angliavandeniliams perskirti.

Išgarinimu pro membraną vadinamas skystų mišinių perskyrimas esant skirtingiems komponentų pernešimo greičiams, kuriuos sąlygoja jų difuzijos koeficientų vertės. Iš pradinio tirpalo pro membraną į inertinių dujų srautą vakuumu nusiurbiami garai, kurie po to kondensuojasi kondensatoriuje. Taip pat naudojami išgarinimo pro membraną įrenginiai, kuriuose naudojama ne inertinė aplinka, o tik paprasčiausias vakuumas ir oras. Išskyrimo metu, naudojant polimerines neporėtas membranas, medžiaga tirpsta membranoje (sorbcija), difunduoja pro membraną ir yra desorbuojama vakuumo arba dujinės fazės kitoje jos pusėje. Naudojant keramines bei kitas porėtąsias membranas, medžiaga tiesiog adsorbuojama membranos paviršiuje. Garų sudėtis priklauso nuo temperatūros, membranos medžiagos, mišinio sudėties; slėgio įtaka maža. Greičiui padidinti tirpalas pašildomas iki 30...60 °C, o garų zonoje sudaromas vakuumas.

Šiame procese naudojamos polimerų bei keramikos porėtosios ir neporėtosios membranos arba įvairius pagrindus dengiantys ploni jų sluoksniai, t. y. kompozicinės membranos. Tokios membranos pasižymi dideliu hidrodinaminiu pasipriešinimu, todėl jas tikslinga gaminti kaip kompozitus – ant porėto pagrindo sudarant ypač ploną atrankiąją plėvelę.

Išgarinimą pro membraną geriausia naudoti azeotropiniams mišiniams, skirtingų klasių angliavandeniliams, organinių rūgščių vandeniniams tirpa-

lams, ketonams perskirti, nuotekoms valyti, cheminių reakcijų pusiausvyrai pastumti, pašalinant vieną iš produktų, arba reagentams selektyviai tiekti į reakcijos terpę.

Dializės procesas vyksta dėl difuzijos pro puslaidę membraną, skiriančią skirtingų koncentracijų tirpalus, greičių skirtumo. Dažniausiai ji naudojama perskirti medžiagoms, kurių molekulinės masės (kartu ir difuzijos koeficientai) labai skiriasi. Susidaro koncentruotojo ir praskiestojo tirpalų koncentracijų skirtumas ir ištirpusios medžiagos skirtingais greičiais difunduoja pro membraną į mažesnės koncentracijos tirpalą. Tirpiklis (paprastai vanduo) juda į priešingą pusę ir sumažina ištirpusių medžiagų pernešimo greitį. Dializės greitis nusakomas pirmuoju Fiko dėsniu ((24.6) lygtis).

Dializė atliekama membraniniuose plokščiuose kameriniuose arba tuščiavidurio pluošto aparatuose. Perneštos medžiagos masė apskaičiuojama pagal lygtį

$$M = K_D \cdot F \cdot \Delta c_{vid} \cdot \tau \; ; \qquad (24.8)$$

čia Δc_{vid} – vidutinė proceso varos jėga; K_D – dializės masės perdavimo koeficientas (dažniausiai nustatomas eksperimentiškai); F – membranos plotas (apskaičiuojamas žinant M ir K_D).

Dializės masės perdavimo koeficientą galima apskaičiuoti pagal lygtį

$$K_D = \frac{1}{(1/\beta_1)+(\delta/D)+(1/\beta_2)} \; ; \qquad (24.8a)$$

čia β_1 ir β_2 – masės perdavimo koeficientai abiejose membranos pusėse; δ – membranos storis; D – difuzijos koeficientas.

Kaip puslaidės membranos naudojamas celofanas, acetilceliuliozės ir nitroceliuliozės plėvelės, mikroporėtasis polivinilchloridas. Dializė taikoma mažos molekulinės masės junginiams išskirti chemijos ir medicinos pramonėje, biocheminių preparatų gamyboje ir medicinoje. Daugeliu atvejų, kai virš perskiriamojo tirpalo galima sudaryti didelį slėgį, vietoj dializės naudojamas intensyvesnis membraninis procesas – ultrafiltravimas.

24.2.3. Elektromembraniniai procesai

Šie procesai vyksta dėl elektrinio potencialo pokyčių membranoje. Plačiausiai taikoma *elektrodializė* – tirpalų perskyrimas sudarant elektrinį potencialą tarp abiejų membranos pusių. Šios membranos gaminamos iš polimerinių ar neorganinių medžiagų (porų dydis $(2...8)\cdot 10^{-3}$ μm). Jos pralaidžios visiems jonams ir naudojamos elektrolitams atskirti nuo ne elektrolitų. Kitos membranos, atrankios tik katijonams ar anijonams, gaminamos iš jonitų. Jonų mainų membranos naudojamos druskoms šalinti iš elektrolitų ir jonams frak-

cionuoti. Pvz., membrana turi katijoninių grupių, fiksuotų matricos, iš kurios gaminama membrana, dervoje. Įdėjus tokią membraną į elektrolito tirpalą, jame esantys anijonai išstumia dervoje esančius kitus anijonus, o fiksuoti dervos katijonai atstumia tirpalo katijonus. Analogiškai veikia anijoninių grupių turinti membrana.

Elektrodializę galima taikyti ne tik skirtingus krūvius, bet ir vienodą krūvį turintiems jonams atskirti, pasinaudojant skirtingais jų judėjimo pro membraną greičiais. Plačiausiai yra paplitę plokščios konstrukcijos elektrodializatoriai (24.6 pav.); taip pat naudojami ir ritininiai elektrodializatoriai.

Iš *n* gardelių susidedančių elektrodializatorių pagrindinės charakteristikos yra:

- našumas, ekv/l:

$$G = I \cdot F \cdot n/16{,}454\ ; \qquad (24.9)$$

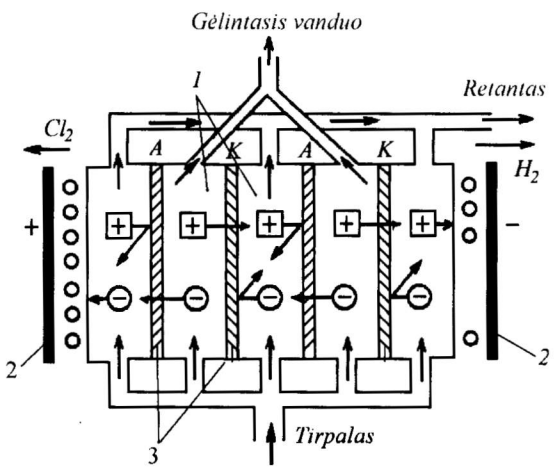
- elektrinio potencialo sumažėjimas:

$$\Delta E = E_D + I \cdot (R_M + P_P) \cdot n\ ; \qquad (24.10)$$

- reikalinga galia, kW:

$$N = (I \cdot F/1000) \cdot E_D + I \cdot (R_M + R_P) \cdot n/1000\ ; \qquad (24.11)$$

čia I – srovės tankis, A/m^2; F – membranos plotas, m^2; E_D – skilimo ir viršįtampio potencialų elektroduose suma, V; R_M ir R_P – atitinkamai membranos ir tirpalo elektrinės varžos, Ω/cm^2.



24.6 pav. Elektrodializės aparato schema: *1* – kameros, *2* – elektrodai, *3* – membranos (*A* – anijonų mainų, *K* – katijonų mainų)

Tekant elektros srovei per membranų paketą, aparate katijonai migruoja prie katodo (neigiamojo elektrodo), anijonai – prie anodo (teigiamojo elektrodo). Kadangi membranos praleidžia tik vienos rūšies jonus, kamerose paeiliui daugėja arba mažėja elektrolito. Tirpalas išteka dviem srautais: gėlintojo vandens ir koncentrato.

Elektrodializė plačiausiai naudojama druskoms šalinti iš elektrolitų ir elektrolitams koncentruoti, jūros vandeniui gėlinti, cukraus tirpalams, pieno išrūgoms demineralizuoti, mineralams gauti iš gamtinių druskingųjų vandenų.

24.3. Termomembraniniai procesai

Šie procesai yra sąlygojami temperatūros gradiento porėtosios polimerinės ar kietos struktūros medžiagos membranos storyje. Plačiausiai ištirta ir taikoma membraninė distiliacija. Šio proceso esmė tokia. Pašildytas iki palyginti neaukštų temperatūrų (30...70 °C) pradinis tirpalas tiekiamas iš vienos hidrofobinės porėtosios membranos pusės. Išilgai kitos membranos pusės juda vėsesnis (šaltas) tirpiklis (dažniausiai vanduo). Kadangi membrana hidrofobinė, porų skersmenys yra 1 μm eilės ir mažesni, tai skystoji fazė į membranas nepatenka. Nuo šilto tirpalo paviršiaus (garavimo paviršius prilyginamas į poras įtekančio tirpalo susidarančio menisko paviršiui) kylantys garai patenka į membranos poras, difunduoja pro poroje esantį oro sluoksnį ir kondensuojasi ant šalto skysčio meniskų. Porose susidaro išretėjimas, spartinantis garavimo procesą ir didinantis jo efektyvumą. Kadangi pradinio tirpalo temperatūra neaukšta, distiliavimo procese galima naudoti žemos temperatūros šildalą – iš šaldytuvo ištekančio pašildyto vandens, vidaus degimo variklių išmetamųjų dujų, geoterminių vandenų, saulės energiją.

Membraninis distiliavimas naudojamas elektrolitų vandeniniams tirpalams koncentruoti ir demineralizuoti, jūros vandeniui gėlinti, ypač švariam vandeniui gaminti medicinos reikmėms, vandeniui papildyti garo katiluose.

Membraninio distiliavimo procesas vyksta atmosferos slėgyje, todėl aparatai gali būti gaminami iš pigių polimerinių medžiagų, jų sugedusias dalis lengva pakeisti, membranos ilgai neužsiteršia.

24.4. Membraniniai aparatai

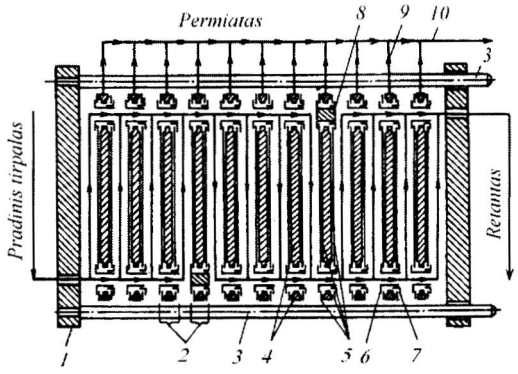
Aparatai, kuriuose komponentai perskiriami naudojant puslaides membranas, vadinami membraniniais aparatais. Jie turi atitikti šiuos reikalavimus: būti lengvai prižiūrimi; membranos turi turėti didelį savitąjį darbinį paviršių, m^2/m^3; skystis proceso metu turi tolygiai pasiskirstyti membranos paviršiuje ir tekėti pakankamai dideliu greičiu, kad būtų išvengta koncentracinės poliarizacijos įtakos; slėgio nuostoliai aparate turi būti nedideli.

Pagal membranų formą skiriami membraniniai aparatai su plokščiais ir su vamzdiniais membraniniais elementais, su ritininėmis membranomis, su tuščiavidurio pluošto membranomis. Šie aparatai gali būti korpusiniai ir be korpuso.

Pagal membranų išdėstymą membraniniai aparatai skirstomi į vertikaliuosius ir horizontaliuosius; pagal montavimo sąlygas – į surenkamuosius ir neardomuosius. Priklausomai nuo konstrukcijos ir įrenginių schemos aparatai gali veikti idealaus išstūmimo ir idealaus sumaišymo režimu.

Plokščiųjų membraninių elementų aparatų membranos yra lakštinės, sudėtos abipus plokščio, porėto drenažo arba suformuotos tiesiai ant jo paviršiaus. Atstumas tarp gretimų membranų 0,5...5 mm. Tarp jų teka tirpalas. Jis iš eilės prateka visus membraninius elementus, koncentruojasi ir pasišalina iš aparato. Pro membraną į drenažą ištekėjęs tirpalas sudaro permiatą. Plokščiųjų membraninių elementų pranašumai yra paprasta jų gamyba ir priežiūra, mažas hidraulinis pasipriešinimas; trūkumas – mažas naudingasis plotas.

Membraniniai elementai būna apvalūs (elipsiniai) ir stačiakampiai, arba kvadratiniai. Elementų forma turi didelę įtaką tirpalo tekėjimui virš membranos paviršiaus. 24.7 paveiksle pateikta srautų pasiskirstymo plokščiuosiuose elipsės formos membraniniuose elementuose schema.

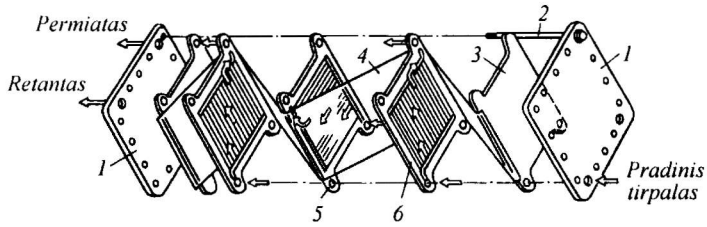


24.7 pav. Plokščiųjų elipsės formos membraninių elementų aparato schema: *1* – flanšas, *2* – membraniniai elementai, *3* – kreipiamieji strypai, *4* – atraminės plokštės, *5* – membranos, *6* – pratekamasis žiedas, *7* – uždaromasis žiedas, *8* – aklė, *9* – vamzdelis, *10* – filtrato kolektorius

Aparatą sudaro paketas elipsės formos membranų *2*, esančių tarp apvalių flanšų *1*. Jiems centruoti įrengti du kreipiamieji strypai *3*, ant kurių galų užsukamos veržlės aparato sandarumui užtikrinti. Membraninius elementus sudaro atraminės plokštelės *4*, kurių abiejose pusėse išdėstytos membranos *5*. Angos membranose ir atraminėse plokštelėse tiksliai sutampa ir yra sandarinamos

dviem užspaudžiamaisiais žiedais: pratekamaisiais *6* – nuo perskiriamojo mišinio tiekimo angų pusės ir uždaromaisiais *7* – nuo ištekėjimo angų pusės. Perskiriamajam tirpalui tiekti iš pratekamojo kanalo į tarpmembraninę erdvę ir toliau į pratekamąją angą, pratekamuosiuose žieduose yra radialinės įpjovos. Pratekamasis žiedas blogai įeina į lizdą, gaubiantį angą, ir taip pasiekiamas visų centruojamųjų angų ašių sutapimas ir patikimas pratekamųjų angų sandarumas ties siaurais membranų, įdėtų tarp žiedų *6* ir *7*, krašteliais. Skiriamajam mišiniui paskirstyti po sekcijas viena atitinkamo membraninio elemento pratekamųjų angų yra uždaroma akle *8*. Permiatas išleidžiamas atskirai iš kiekvieno membraninio elemento ir lanksčiu vamzdeliu *9* tiekiamas į bendrą kolektorių *10*.

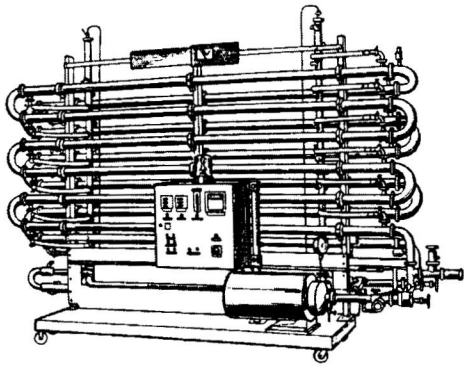
Elipsinių ir apskritųjų membraninių aparatų trūkumai: neracionaliai naudojamos lakštinės medžiagos (membranų, atraminių plokščių), sunku sandarinti angas, tirpalas netolygiai teka pro tarpmembraninio kanalo skerspjūvį, gali susiformuoti užsistovėjimo zonos. Šių trūkumų neturi stačiakampiai plokščiamembraniai aparatai (24.8 pav.).



24.8 pav. Aparatas su nepertraukiamaja juostine membrana:
1 – flanšas, *2* – suveržiamasis varžtas, *3* – tankinamoji plokštelė, *4* – membrana, *5* – drenažo plokštė, *6* – skiriamoji plokštė

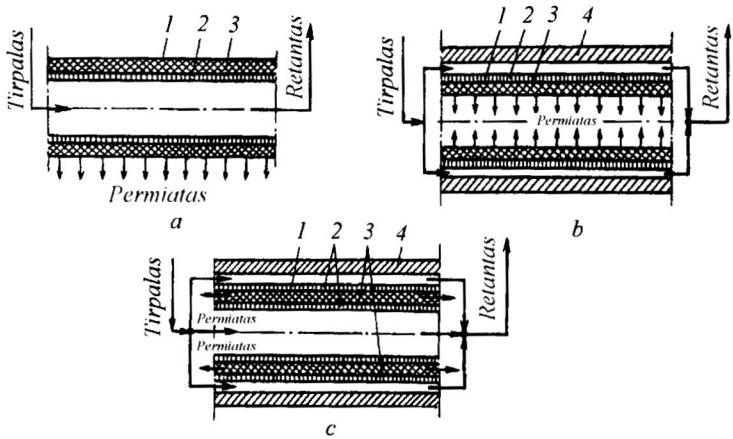
Tarp varžtais *2* suveržiamų flanšų *1* įdėtos dvi sandarinamosios plokštelės *3*, o tarp jų yra paketas pakaitomis sudėtų drenažo *5* ir skiriamųjų *6* plokštelių. Aparato skiriamasis bruožas tas, kad jame membrana nepjaustoma gabalais, o ja nuosekliai padengiamos visos drenažo plokštelės. Plokščiakamerių aparatų trūkumas yra nedidelis membranų savitasis paviršius (aparato 1 m^3 tūriui – nuo 60 iki 300 m^2), taip pat rankinis membranų keitimas.

Aparatai su cilindrinėmis filtruojamosiomis membranomis. Tokie aparatai surenkami iš atskirų cilindrinių filtruojamųjų modulių (24.9 pav.).



24.9 pav. Membraninio aparato su cilindriniais filtruojamaisiais elementais schema

Aparatų pagrindinė detalė – vamzdinis membraninis elementas (24.10 pav.), susidedantis iš membranos *2* ir drenažo karkaso *4*. Drenažo karkasas gaminamas iš atraminio vamzdžio, užtikrinančio filtrato nutekėjimą, ir mikroporėtojo pagrindo *3*. Vamzdinių aparatų membrana gali būti vamzdžio viduje (24.10 pav., *a*), išorėje (24.10 pav., *b*) ir kombinuoto išdėstymo (24.10 pav., *c*).



24.10 pav. Vamzdinio membraninio aparato elementų schema:
a – membrana viduje, *b* – membrana išorėje, *c* – kombinuota konstrukcija; *1* – vamzdis, *2* – membrana, *3* – pagrindas, *4* – korpusas ir drenažo karkasas

Plačiausiai naudojami aparatai su membrana vamzdžio viduje. Jų pranašumai: neturi korpuso; dėl trumpo drenažo kanalo mažas hidraulinis pasiprie-

šinimas; geros membranos hidrodinaminės darbo sąlygos (tolygus srauto pasiskirstymas, didelis greitis, nėra užsistovėjimo zonų); mechaninis membranų valymas neišardant aparato; mažesnė tikimybė pažeisti membranų sluoksnį; patogus membraninių elementų tvirtinimas; patikimas aparato sandarinimas.

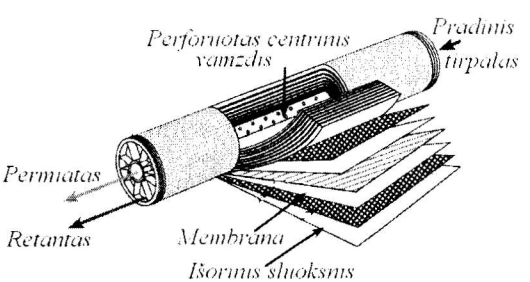
Trūkumai: mažas savitasis membranų paviršius (60...200 m^2/m^3); reikia labai tiksliai pagaminti ir mechaniškai apdirbti vidinį drenažo karkaso paviršių; negalima vizualiai kontroliuoti membranų formavimo proceso.

Formuojant membraną vamzdžio išorėje, galima gauti mažų skersmenų membranų elementus ir gerokai padidinti savitąjį membranų paviršių aparate, nereikia labai tiksliai apdirbti drenažo karkaso ir galima kontroliuoti membranos formavimo procesą. Tačiau šiems aparatams reikia daug medžiagų (reikalingas korpusas, palaikantis darbinį slėgį), blogos hidrodinaminės sąlygos, juos sunku valyti, keičiant vamzdelius lengva pažeisti atrankųjį membranų sluoksnį.

Aparatų su kombinuotai išdėstytomis membranomis membranos formuojamos tiek vamzdžio viduje, tiek išorėje. Aparatų membranos turi didelį savitąjį paviršių, bet jiems būdingi abiejų tipų membraninių vamzdinių elementų trūkumai – didelis hidraulinis pasipriešinimas dėl ilgo filtrato kelio vamzdžio vidumi. Šie aparatai naudojami tirpalams, kuriuose gali susidaryti nuosėdos, ultra- ir mikrofiltruoti, taip pat labai druskingam vandeniui gėlinti atvirkštiniu osmosu.

Ultrafiltravimo aparatai su cilindriniais filtruojamaisiais elementais plačiai naudojami vaisių sultims nuskaidrinti. Iš sulčių atskiriamos visos sultims drumstumą suteikiančios nuosėdos, pvz., proteinas, krakmolas, pektinas, medingosios didelės molekulinės masės medžiagos, celiuliozės dalelės ir kitos priemaišos. Nuskaidrintose sultyse lieka natūralaus pavidalo nesuardytų medžiagų.

Aparatų su ritininiais membraniniais elementais membranos turi didelį savitąjį paviršių (300...800 m^2/m^3), jiems mažai reikia metalo, daugelis priežiūros operacijų gali būti mechanizuotos. Aparatų trūkumai: sunku montuoti kai kurių konstrukcijų paketus; pažeidus membraną būtina keisti visą paketą; didelis hidraulinis pasipriešinimas.

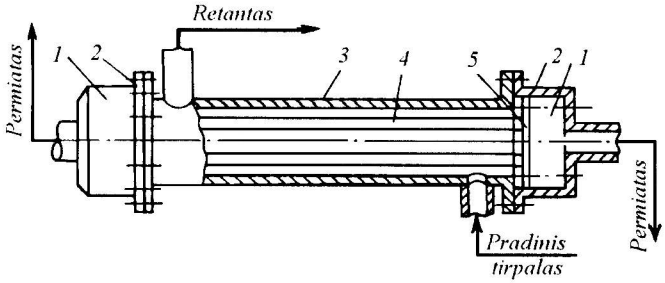


24.11 pav. Ritininė membrana

Aparatai su tuščiaviduriu pluoštu plačiai naudojami perskirti tirpalams atvirkštiniu osmosu ir ultrafiltravimu. Tuščiavidurio pluošto membranos, skirtos atvirkštiniam osmosui, paprastai būna 45...200 μm išorinio skersmens ir turi 10...50 μm storio sieneles, o skirtos ultrafiltravimui – atitinkamai 200...1000 ir 50...200 μm. Taip užtikrinamas reikalingas pluošto atsparumas esant darbiniams slėgiams (iki 10 MPa). Šie aparatai yra paprastos konstrukcijos, lengvai surenkami ir patogūs eksploatuoti. Jų membranų didelis savitasis paviršius (iki 20...30 tūkst. m^2/m^3), todėl jie plačiai naudojami dideliais kiekiais gaminant ypač švarų vandenį, maisto pramonėje, valant ir perskiriant dujas. Tačiau eksploatuojant šiuos aparatus keliami dideli reikalavimai išankstiniam dujų ir mišinių valymui. Susidėvėjus daliai pluošto, reikia keisti visą pluošto gniūžtę.

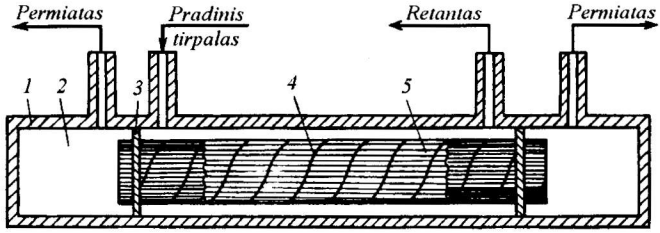
Aparatai su tuščiaviduriu pluoštu skirstomi taip: su lygiagrečiai išdėstytu pluoštu (24.12 pav.), su cilindriniais membraniniais elementais (24.13 pav.), su *U* forma išdėstytu pluoštu (24.14 pav.).

Aparatai su tuščiaviduriu pluoštu gali būti neatraminiai ir su atraminiais skirstomaisiais vamzdžiais. Neatraminių aparatų paprastesnė konstrukcija, bet blogesnės hidraulinės charakteristikos. Hidraulinėms sąlygoms pagerinti naudojami įvairūs paskirstymo įrenginiai ir maišyklės.

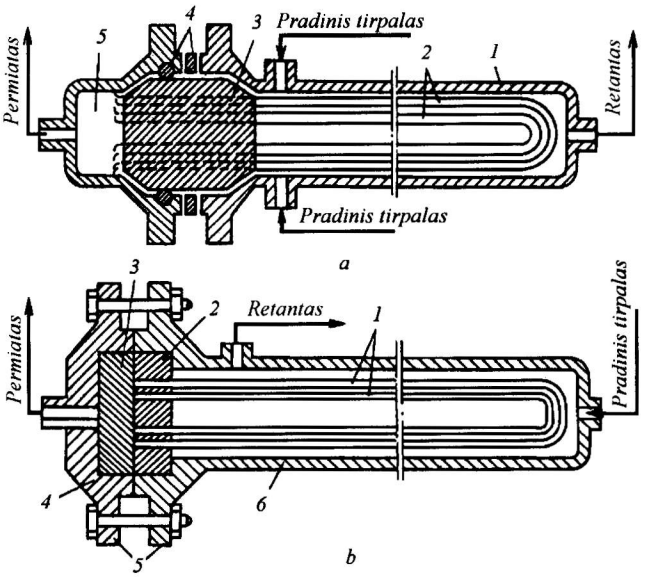


24.12 pav. Aparatų su lygiagrečiai išdėstytu pluoštu schema:
1 – filtrato rinktuvai, *2* – flanšai, *3* – korpusas, *4* – pluoštinės membranos, *5* – vamzdinė pertvara

Aparatų su lygiagrečiai išdėstytu membranų pluoštu trūkumai: pluošto gniūžtes sunku tvirtinti ir sandarinti, pradinis tirpalas netolygiai pasiskirsto gniūžtėse. Šių trūkumų neturi aparatai, kuriuose pluoštas sudaro vieną gniūžtę (24.13 pav.), tačiau jie netinka tirpalams, turintiems disperguotų dalelių, filtruoti.



24.13 pav. Aparato su viena pluošto gniūžte schema:
1 – korpusas, *2* – filtrato rinktuvas, *3* – jungtis, *4* – spiralinis siūlas, *5* – membranų pluošto gniūžtė



24.14 pav. Aparatų su *U* formos pluoštu schema:
a – su kūginiu atraminiu flanšu: *1* – korpusas, *2* – membranų pluošto gniūžtė, *3* – poveržlė, *4* – žiedinis tarpiklis, *5* – filtrato rinktuvas;
b – su porėtu atraminiu pagrindu: *1* – membranų pluošto gniūžtė, *2* – poveržlė, *3* – porėtasis pagrindas, *4* – dangtelis, *5* – flanšinis sujungimas, *6* – korpusas

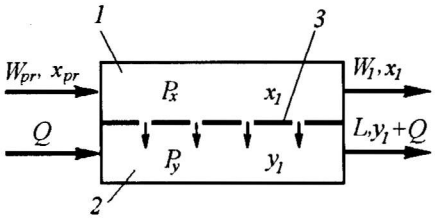
Aparatus su *U* formos pluoštu (24.14 pav.) paprasta gaminti ir surinkti, patogu eksploatuoti, todėl jie plačiai naudojami.

24.5. Membraninių procesų ir aparatų skaičiavimai

Visiems membraniniams procesams bendros skaičiavimo metodikos nėra, ji dar tik kuriama. Visas membraninių įrenginių skaičiavimas susideda iš technologinių, hidraulinių ir mechaninių skaičiavimų. Kai naudojamas šildymas ar aušinimas, reikalingi ir šiluminiai skaičiavimai. Technologinio skaičiavimo metu nustatomas reikalingas membranų plotas, skysčių srautai ir jų sudėtis. Hidraulinio skaičiavimo tikslas – nustatyti aparatų ir armatūros pasipriešinimą, mechaninio skaičiavimo – aparatų elementų pagrindimas ir armatūros atitinkamiems slėgiams parinkimas. Šiluminiais skaičiavimais nustatomas šilumos perdavimo paviršiaus plotas ir šildalų sąnaudos.

24.5.1. Baromembraninių procesų medžiagų balansas

Membraniniai procesai vyksta esant pastoviai temperatūrai ir slėgiui. Procesų skaičiavimams atlikti dažniausiai pasirenkami tokie dydžiai: pradinio tirpalo kiekis W_{pr}, kg/h, ir jo sudėtis arba koncentracija x_{pr}, kg/kg, permiato L (produkto) koncentracija y_1, kg/kg (24.15 pav.).



24.15 pav. Membraninio elemento schema:
1 – erdvė virš membranos, *2* – erdvė po membrana, *3* – membrana; W_{pr} – pradinis tirpalas, Q – inertinis skiediklis, kai jis naudojamas, W_1 – retantas (koncentratas), L – permiatas (produktas), P_x – slėgis erdvėje virš membranos, P_y – slėgis erdvėje po membrana; x_1 – koncentracija virš membranos; y_1 – koncentracija po membrana

Tuomet produkto išeiga a apskaičiuojama pagal lygtį

$$a = \frac{L}{W_{pr}}. \qquad (24.12)$$

Pagal produkto išeigą apskaičiuojamas jo kiekis:

$$L = a \cdot W_{pr}. \qquad (24.13)$$

Medžiagų balansas pagal srautus:

$$W_{pr} = W_1 + L. \qquad (24.14)$$

Iš (24.13) lygties randamos koncentrato sąnaudos:

$$W_1 = W_{pr} - L. \tag{24.15}$$

Medžiagų balansas pagal komponentus:

$$W_{pr} \cdot x_{pr} = W_1 \cdot x_1 + L \cdot y_1. \tag{24.16}$$

Tuomet, atsižvelgiant į koncentrato sudėtį, gaunama:

$$x_1 = \frac{W_{pr} \cdot x_{pr} - L \cdot y_1}{W_{pr} - L}, \tag{24.17}$$

arba

$$x_1 = \frac{x_{pr} \cdot \frac{L}{W_{pr}} \cdot y_1}{1 - \frac{L}{W_{pr}}}. \tag{24.18}$$

Remiantis (24.12) lygtmi, gaunama:

$$x_1 = \left(x_{pr} - a \cdot y_1\right) \cdot \left(1 - a\right). \tag{24.19}$$

Membranos atrankumas, arba selektyvumas, φ apskaičiuojamas pagal (24.1) lygtį. Pagal φ dydį ir tirpalo savybes žinynuose parenkama atitinkama membrana, surandama membranos savitojo našumo priklausomybė nuo tirpalo sudėties prie jos:

$$G = f\left(x_1\right). \tag{24.20}$$

Žinant G ir x_1, pagal (24.2) ir (24.12) lygtis apskaičiuojamas puslaidės membranos paviršiaus plotas:

$$F = \frac{L}{G} = \frac{a \cdot W_{pr}}{f(x_1)}. \tag{24.21}$$

24.5.2. Membranų paviršiaus skaičiavimas

Membranų skaičiavimo metodas parenkamas išanalizavus proceso mechanizmą. Remiantis hidrodinamika (Navjė ir Stokso bei vientisojo srauto lygtimis) ir masės pernešimu (konvekcine ir molekuline difuzija), gaunamos pagrindinės charakteristikos (atrankumas, arba selektyvumas; laidumas; reikalingas membranų paviršius). Šis būdas sudėtingas, nes sunku nustatyti koncentracijas ribiniuose fazių sluoksniuose, fazių kontakto paviršių, todėl naudojamas kitas būdas, kai procesas skaidomas į stadijas, apskaičiuojami kiekvie-

nos stadijos greičiai ir pagal masės perdavimo lygtį apskaičiuojamas membranos plotas. Metodas geras tuo, kad aparatus galima apskaičiuoti be išankstinių eksperimentų.

Pro membraną praėjusios medžiagos masė apskaičiuojama pagal pagrindinę masės perdavimo lygtį:

$$M = K \cdot F \cdot \Delta_{vid.} \cdot \tau ; \qquad (24.22)$$

čia K – masės perdavimo koeficientas; F – membranos paviršiaus plotas; Δ_{vid} – membraninio proceso varos jėga; τ – proceso trukmė.

Pagal (24.21) lygtį apskaičiuojamas membranos paviršiaus darbinis plotas:

$$F = \frac{M}{K \cdot \Delta_{vid.} \cdot \tau} . \qquad (24.23)$$

M galima apskaičiuoti pagal medžiagų balanso lygtį. Masės perdavimo koeficientas

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\beta_1} + \frac{\delta}{\lambda_M} + \frac{1}{\beta_2}} ; \qquad (24.24)$$

čia β_1 – masės atidavimo nuo perskiriamojo mišinio membranos paviršiui koeficientas; δ – membranos storis; λ_M – membranos masės laidumo koeficientas; β_2 – masės atidavimo nuo membranos produkto srautui koeficientas.

Masės perdavimo koeficientas K gali būti išreikštas per bendrą membranos varžą ($K = 1/R$):

$$R = r_1 + r_M + r_2 = \frac{1}{\beta_1} + \frac{\delta}{\lambda_M} + \frac{1}{\beta_2} ; \qquad (24.25)$$

čia r_1 ir r_2 – masės perdavimo atitinkamai nuo mišinio membranos paviršiui ir nuo membranos produkto srautui varža; r_M – masės laidumo varža membranoje.

Bendra varža R priklauso nuo membraninio proceso tipo ir vyksmo sąlygų. Pvz., esant difuziniam dujų perskyrimui, kai slėgių skirtumas nedidelis, didžiausia bus pačios membranos varža ($r_M >> r_1 + r_2$), todėl r_1 ir r_2 galima nepaisyti; atvirkštinio osmoso ir ultrafiltravimo metu dydis r_2 yra mažas; išgarinimo pro membraną metu įtakos turi visi trys dydžiai. Dydis r_M nustatomas eksperimentiškai.

24.5.3. Koncentracinės poliarizacijos skaičiavimai

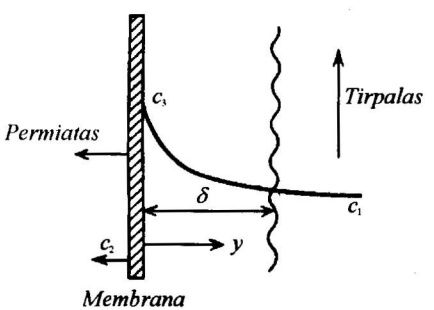
Perskiriant skystus mišinius, pro membraną daugiausia pereina tirpiklis, todėl prie membranos esančiame sluoksnyje medžiagos koncentracija didėja. Ji didėja tol, kol nusistovi dinaminė pusiausvyra tarp koncentruoto tirpalo difuzijos iš ribinio sluoksnio atgal į perskiriamąjį tirpalą.

Ištirpusios medžiagos koncentracijos prie membranos paviršiaus santykis su perskiriamojo tirpalo koncentracija vadinamas *koncentracine poliarizacija.* Ji neigiamai veikia darbines membranos charakteristikas – mažina proceso varos jėgą, ant membranos gali nusėsti sunkiai tirpstančios druskos, stambiamolekulių junginių geliai, todėl ją reikia valyti.

Koncentracinės poliarizacijos skaičiavimai remiasi įvairiais masės pernešimo per membraną modeliais. Naudojantis medžiagos koncentracijos pasiskirstymo prie membranos paviršiaus modeliu (24.16 pav.), gaunama:

$$G_2 = -D \cdot \frac{dc}{dy} - G_1 \cdot c \; ; \qquad (24.26)$$

čia G_1 ir G_2 – savitasis membranos pralaidumas tirpikliui ir ištirpusiai medžiagai; D – ištirpusios medžiagos difuzijos koeficientas; c – tirpalo koncentracija; y – atstumas nuo tiriamojo taško iki membranos.



24.16 pav. Koncentracijos pasiskirstymas ribiniame membranos pasienio sluoksnyje: c_1 – tirpalo koncentracija, c_2 – filtrato koncentracija, c_3 – koncentracija prie membranos paviršiaus; δ – ribinio sluoksnio storis, y – atstumas nuo tiriamojo taško iki membranos

Tikrasis membranos atrankumas, arba selektyvumas, φ_t apskaičiuojamas atsižvelgiant į koncentracinę poliarizaciją:

$$\varphi_t = \frac{c_3 - c_2}{c_3} \; ; \qquad (24.27)$$

čia c_3 – koncentracija prie membranos paviršiaus; c_2 – filtrato koncentracija.

Jei ištirpintos medžiagos srautas pastovus visame membranos paviršiaus sluoksnio ilgyje, tai

$$G_2 = -(1-\varphi_l)\cdot c_3 \cdot G_l . \tag{24.28}$$

Naudojantis (24.24) ir (24.25) lygtimis, gaunama:

$$D\cdot\frac{dc}{dy} + c_l \cdot G_l = (1-\varphi_t)\cdot c_3 \cdot G_l . \tag{24.29}$$

Ribinės sąlygos: kai $y = 0$, $c = c_3$, kai $y = \delta$, $c = c_l$; čia δ – ribinio sluoksnio storis.

Integruodami (24.26) lygtį, gauname:

$$\frac{c_3}{c_1} = KP = \frac{e^{\frac{G_1\cdot\delta}{D}}}{\varphi_t + (1-\varphi_t)\cdot e^{\frac{G_1\cdot\delta}{D}}}; \tag{24.30}$$

čia KP – koncentracinė poliarizacija.

Santykis D/δ yra masės perdavimo nuo membranos į tirpalą koeficientas β:

$$KP = \frac{e^{\frac{G_l}{\beta}}}{\varphi_t + (1-\varphi_t)\cdot e^{\frac{G_l}{\beta}}}. \tag{24.31}$$

Jei $\varphi_t = 1$,

$$KP = exp(G_l/\beta). \tag{24.32}$$

Atsižvelgiant į maišymo režimą ir naudojant Čiltono ir Kolborno faktorių

$j = \frac{\beta}{w}(Pr')^{2/3}$, (24.31) lygtis perrašoma taip:

$$KP = \frac{e^{\frac{G_l}{j\cdot w}\cdot(Pr')^{2/3}}}{\varphi_t + (1-\varphi_t)\cdot e^{\frac{G_l}{j\cdot w}\cdot(Pr')^{2/3}}}; \tag{24.33}$$

čia w – vidutinis tirpalo judėjimo greitis, $Pr' = \frac{\nu}{D}$ – difuzinis Prandtlio kriterijus; ν – kinetinė tirpalo klampa.

Į (24.30) lygtį įrašę atrankumą $\varphi = 1 - c_2/c_1$, gauname lygtį, naudojamą atvirkštiniam osmosui plokščiame tarpmembraniniame kanale aprašyti:

$$ln\frac{1-\varphi}{\varphi} = \frac{G_1}{j \cdot w} \cdot (Pr')^{2/3} + ln\frac{1-\varphi_t}{\varphi_t}. \qquad (24.34)$$

Elektrolitams, kurių tankis labai priklauso nuo koncentracijos, didelę įtaką turi konvekcija, ypač kai aparatai yra su horizontaliomis plokščiomis membranomis.

Koncentracinės poliarizacijos sukeliami reiškiniai: membranos skiriamojoje pusėje užsiteršia kietomis medžiagomis; sumažėja membranų atrankumas (selektyvumas) ir savitasis našumas; eksponentinis koncentracijų santykio membranų paviršiniame sluoksnyje didėjimas riboja membranų laidumą nano- ir ultrafiltravimo, taip pat atvirkštinio osmoso procesuose.

Koncentracinė poliarizacija gali būti mažinama tokiais būdais:

I. Mažinant membranų laidumą:

1) mažinant slėgį;
2) storinant membraną.

II. Intensyvinant masės perdavimą nuo membranos tirpalo srautui:

1) didinant tirpalo arba membranos temperatūrą;
2) mechaniškai (maišyklėmis; vibruojant membraną; sukeliant tirpalo pulsacijas) arba nemechaniškai (didinant greitį; apsukant srautą; didinant natūralią konvekciją) maišant;
3) keičiant tarpmembraninių kanalų konfigūraciją:
   a) trumpinant kanalus;
   b) siaurinant kanalus;
   c) naudojant turbulizuojančiuosius įdėklus;
4) tarpmembraniniuose kanaluose naudojant tvirtą, judrią dispersinę fazę:
   a) sukeliant srauto pulsacijas;
   b) pseudodrumsčiant daleles;
   c) praleidžiant rupius kūnus.

Šiuos metodus, mažinant koncentracinę poliarizaciją, tikslinga taikyti ultrafiltravimui; atvirkštiniam osmosui ir nanofiltravimui. Efektyvūs yra ir paprastesni metodai, pagrįsti hidraulinio pasipriešinimo kanale padidėjimu.

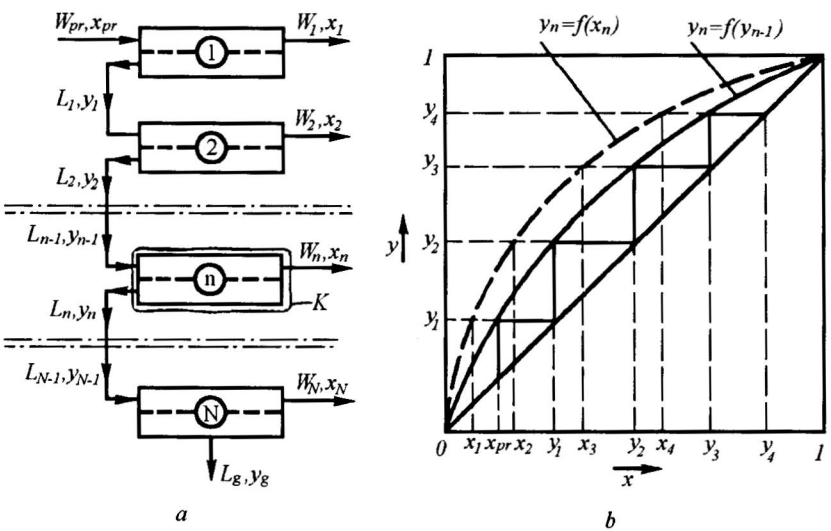
24.5.4. Kaskadinės membraninių elementų schemos

Membraninio perskyrimo tikslas – gauti reikiamo švarumo komponentus. Kadangi membranų atrankumą (selektyvumą) riboja jų cheminė kilmė, komponentų skverbties mechanizmas, jų fizinės cheminės savybės, membraninio elemento konstrukcija, reikiamos koncentracijos srautai gaunami nuosekliai jungiant keletą membraninių elementų. Kai membraniniai elementai aparate

išdėstomi iš eilės žemėjančia tvarka, tokios schemos vadinamos kaskadinėmis. Skaičiuojant kaskadinius aparatus sprendžiami du uždaviniai: pirma – projektuojami nauji aparatai ir antra – nustatomos optimalios jau veikiančių aparatų darbo sąlygos. Pirmuoju atveju, žinant pradinio mišinio kiekį, koncentraciją ir gauto tikslinio produkto koncentraciją, nustatomas elementų skaičius, jų membranų paviršius ir srautų koncentracijos kiekviename elemente. Atliekant eksploatacinius skaičiavimus, kaskados elementų skaičius ir jų membranų paviršiaus plotas būna žinomi, o reikia apskaičiuoti srautų bei koncentracijų vertes visuose kaskados elementuose, įskaitant ir į kaskadą įtekantį srautą.

Toliau panagrinėsime porą kaskados pavyzdžių.

Atviroji kaskada, iš kurios elementų šalinamas pratekantis tirpalas (24.17 pav.). Jei membraniniai elementai sujungti nuosekliai, permiatas iš paskutinio elemento tiekiamas į kito iš eilės elemento ertmę virš membranos, o pro membraną nedifundavęs srautas – retantas recirkuliacijoje nedalyvauja. Ši kaskada vadinama atviraja, iš savo elementų šalinančia difundavusius srautus, ir naudojama permiatui koncentruoti iki reikiamo tikslinio produkto švarumo.



24.17 pav. Atviroji kaskada, šalinanti iš kiekvieno elemento ištekantį srautą: *a* – technologinė schema, *b* – skaičiavimų diagrama

Norint apskaičiuoti mišinio srautų ir tikslinio komponento koncentracijų vertes, užrašomos visų kaskados elementų medžiagų balanso pagal mišinio

srautus ir kaskados n-osios pakopos komponentą lygtys (24.17 pav., *a*, kontūras *K*):

$$L_{n-1} - L_n - W_n = 0; \tag{24.35}$$

$$L_{n-1} \cdot y_{n-1} - L_n \cdot y_n - W_n \cdot x_n = 0. \tag{24.36}$$

Naudodamiesi prasiskverbiančios srauto dalies sąvoką $\Psi_n = L_n / L_{n-1}$, iš (24.35) ir (24.36) lygčių gausime lygtį koncentracijai y_{n-1} perskaičiuoti į koncentraciją y_n:

$$y_{n-1} = x_n \cdot (1 - \Psi_n) + y_n \cdot \Psi_n; \tag{24.37}$$

čia L_i – permiato kiekis; W_{pr} – pradinio tirpalo kiekis; W_i – retanto kiekis; x – tirpalo koncentracija virš membranos; y – tirpalo koncentracija po membrana, Ψ – prasiskverbusio tirpalo dalis; W_{pr} – pradinio tirpalo kiekis.

Tarp koncentracijų y_n ir x_n yra pusiausvira priklausomybė (24.17 pav., *b*), atvaizduota punktyrine linija. (24.37) lygties grafinį vaizdą tame pačiame paveiksle vaizduoja vientisa linija. Šių dviejų, pusiausvyros ir darbo linijų, lygčių pakanka visoms kaskados srautų koncentracijoms nustatyti.

Jeigu kaskados pakopų arba elementų parametrai yra skirtingi (pvz., skirtingi slėgiai pakopose arba skirtingas pakopų membranų atrankumas, skirtingos prasiskverbusio srauto dalys ir t. t.), tai kaskados koncentracijoms skaičiuoti reikia sudaryti tiek minėtų (pusiausvyros ir darbo linijų) lygčių, kiek yra elementų arba pakopų.

Kaskados pakopose arba elementuose debitai apskaičiuojami pagal tokius santykius:

$$\frac{L_1}{W_{pr}} = \Psi_1; \ \frac{L_2}{L_1} = \Psi_2. \tag{24.38}$$

Nesunku įrodyti, kad $\frac{L_i}{W_{pr}} = \prod_{i=1}^{n} \Psi_i$, (24.39)

kai $\Psi_i = idem$, $\frac{L_i}{W_{pr}} = \Psi^n$ ir $\frac{L_N}{W_{pr}} = \Psi^N$; (24.39a)

čia n ir N – momentinis ir bendras pakopų skaičius kaskadoje $n \le N$.

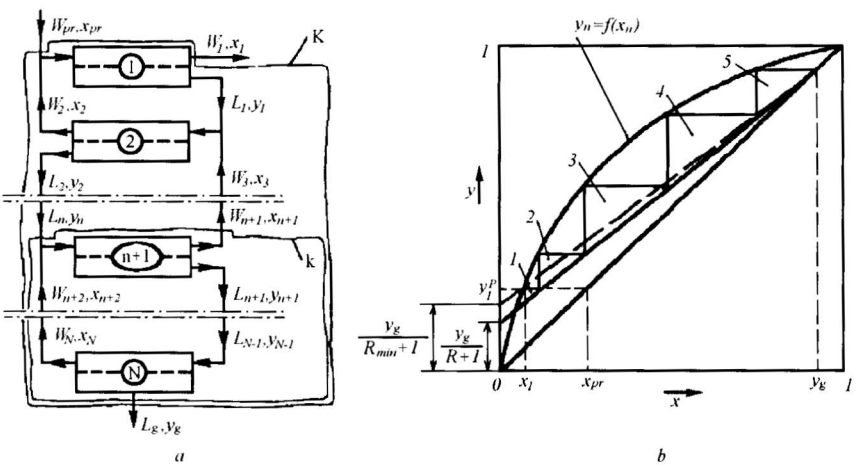
(24.38), (24.39) ir (24.39a) lygtys sujungia į priklausomybes tokius dydžius: į kaskadą ir atskiras jos pakopas įtekančių ir iš kaskados bei atskirų jos pakopų ištekančių srautų debitus, pakopų skaičių ir pro membranas pratekėju-

sių srautų dalis. Paprasčiausiu atveju, kai $\Psi_i = idem$, pakopų skaičius apskaičiuojamas pagal tokią lygtį:

$$N = \frac{ln\left(L_g / W_{pr}\right)}{n\Psi}. \qquad (24.40)$$

Nagrinėtoji schema gera tuo, kad nebūtina didinti ištekančių srautų slėgio, nes jie į perskyrimo procesą negrąžinami. Didžiausias trūkumas yra tai, kad iš kaskados pakopų erdvių virš membranos, t. y. iš perskyrimo proceso, ištekančiuose srautuose W_n dar yra gana didelė išskiriamojo komponento koncentracija x_n. Dėl šios priežasties perskyrimo proceso efektyvumas tokioje kaskadoje būna nedidelis.

Uždaroji kaskada, į kurią grąžinamas pratekantysis tirpalas. Jei pratekančiojo tirpalo koncentracija yra didelė, tikslinga jį pakartotinai perdirbti, t. y. grąžinti į kaskados įtekamąją dalį. Membraniniai elementai sujungti nuosekliai, permiatas recirkuliuoja į elemento ertmę prieš membraną, o retantas recirkuliacijoje nedalyvauja (24.18 pav., *a*). Ši schema naudojama filtratui koncentruoti iki reikiamo švarumo.



24.18 pav. Uždaroji kaskada, į kurią grąžinamas tekantis srautas: *a* – technologinė schema, *b* – skaičiavimų diagrama

Kontūro *k* medžiagų balanso pagal mišinių srautus ir pasirinktą komponentą, įskaitant pakopas nuo $n+1$ iki N, lygtys užrašomos taip:

$$L_n = W_{n+1} + L_g; \qquad (24.41)$$

$$L_n \cdot y_n = W_{n+1} \cdot x_{n+1} + L_g \cdot y_g \cdot \qquad (24.42)$$

Tuomet priklausomybė tarp pernešamo komponento koncentracijų viename aparato skerspjūvyje y_n ir x_{n+1} užrašoma darbo linijos lygtimi

$$y_n = \frac{W_{n+1}}{L_n} \cdot x_{n+1} + \frac{L_g}{L_n} \cdot y_g = \frac{R}{R+1} \cdot x_{n+1} + \frac{1}{R+1} \cdot y_g ; \qquad (24.43)$$

čia $R = \frac{W_{n+1}}{L_g}$ – grąžinamojo arba cirkuliuojančiojo srauto dalis (tai flegmos skaičiaus analogas rektifikacijoje); kompleksas $\frac{R}{R+1}$ yra darbo linijos (24.43) pasvirimo kampo tangentas.

Kai R yra pastovi, (24.43) lygtis išreiškia tiesinę priklausomybę tarp momentinių koncentracijų y_n ir x_{n+1}. Šios priklausomybės grafikui (darbo linijai) nubrėžti $y - x$ diagramoje (24.18 pav., *b*) pakanka turėti du taškus. Apskaičiuojami šių taškų parametrai.

(24.43) lygtimi aprašyta tiesė ordinatėje ($x = 0$) atkerta atkarpą

$$y_n = \frac{y_g}{R+1}, \qquad (24.44)$$

$$y_n = x_{n+1} \cdot \qquad (24.45)$$

Taškų masyvus jungiančiosios įstrižainės lygties (24.45) grafikas ir darbo linija ((24.43) lygties grafikas) susikerta bendro minėtų lygčių sprendinio taške. y_n (24.43) lygtyje prilyginame jo vertei iš (24.45) lygties ir gauname naują lygtį. Ja naudodamiesi, apskaičiuojame įstrižainėje ieškomo antrojo taško abscisę:

$$(R+1) \cdot x_{n+1} = R \cdot x_{n+1} + y_g \cdot$$

Kai $n = N$, gauname:

$$x_{n+1} = y_g \cdot \qquad (24.46)$$

Minimalus srautas, arba recirkuliuojančioji srauto dalis, R_{min} (minimalaus antrosios fazės srauto analogas) nustatomas taip pat, kaip kituose masės mainų procesuose. Reikalingas permiato prisodrinimo laipsnis, arba komponento koncentracija y_g, gaunama, naudojant be galo didelį membraninių elementų arba pakopų (teorinių lėkščių analogų) skaičių. Tam būtina, kad darbo linija, atitinkanti minimalią recirkuliuojančiąją srauto dalį, susikirstų su pusiausvyros linija, apskaičiuota pagal vieną iš literatūroje [20] pateikiamų lygčių, taš-

ke, kurio koordinatės y_1^* ir x_1; čia koncentracija permiate y_1^* pusiausvira su koncentracija retante x_1. Tada R_{min} apskaičiuojame pagal (24.43) lygtį, į ją įrašę $x_{n+1} = x_1$, $y_n = y_1^*$, $R = R_{min}$:

$$\frac{R_{\min}}{R_{\min}+1} = \frac{y_g - y_1^*}{y_g - x_1};$$

iš čia $R_{min} = \dfrac{y_g - y_1^*}{y_g - x_1} = \dfrac{W_1}{L_g}$. (24.47)

Į turimas balanso (24.41) ir (24.42) lygtis įrašius į kontūro K kaskadą įtekančių ir iš jos ištekančių srautų parametrus, galima gauti tokias lygtis:

$$W_{pr} - W_1 - L_g = 0; \tag{24.48}$$

$$W_{pr} \cdot x_{pr} - W_1 \cdot x_1 - L_g \cdot y_g = 0. \tag{24.49}$$

Iš čia, pašalinus W_{pr}, gaunama:

$$\frac{W_1}{L_g} = \frac{y_g - x_{pr}}{x_{pr} - x_1}. \tag{24.50}$$

(24.47) lygtį prilyginus (24.50) lygčiai, gaunama:

$$\frac{y_g - y_1^*}{y_1^* - x_1} = \frac{y_g - x_{pr}}{x_{pr} - x_1} = \frac{W_1}{L_g};$$

iš čia:

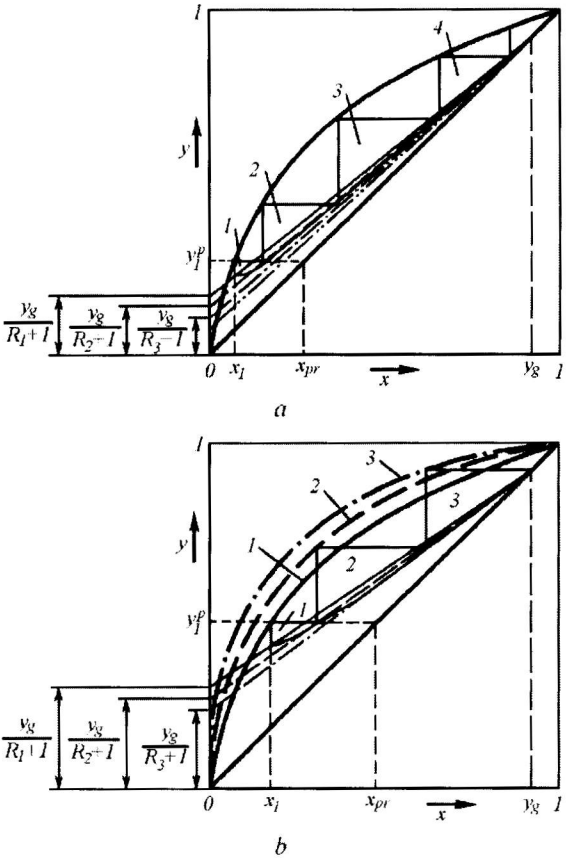
$$y_1^* = x_{pr}. \tag{24.51}$$

Iš techninių ekonominių skaičiavimų žinodami R_{min} vertes, pagal analogiją su rektifikacijos ir kitais masės mainų aparatais nustatome recirkuliuojamojo srauto pertekliaus koeficientą $\sigma = R / R_{min}$ ir apskaičiuojame darbinę recirkuliuojamojo srauto dalį $R = \sigma \cdot R_{min}$. Toliau nubrėžiame darbo liniją, teorines pakopas, nustatome teorinių pakopų skaičių, pernešamojo komponento koncentracijas srautuose y_n ir x_n, taip pat ir srautus W_n ir L_n.

Nustačius srautų debitus ir koncentracijas, nuosekliai pagal kaskados pakopas apskaičiuojami pakopų membranų plotai F_n:

$$F_n = \frac{L_{n+1} \cdot y_{n+1}}{K_{p,n} \cdot P_{x,n} \cdot \left| x_{n+1} - \dfrac{P_{y,n}}{P_{x,n}} \cdot y_{n+1} \right|}. \tag{24.52}$$

Kiekviena kaskados pakopa gali turėti savo atskirą pusiausvyros liniją (pvz., nuo pakopos prie pakopos kinta membranos atrankumas, arba selektyvumas), arba visos pakopos turi skirtingus recirkuliuojamosios srauto dalies vertes R_n. Tada, kaip ir ką tik išdėstytu atveju, apskaičiuojamos kiekvienos pakopos savosios pusiausvyros ir darbo linijos. Toks pavyzdys pateiktas 24.19 pav., *a*.



24.19 pav. Uždarosios kaskados, kai pratekantis srautas recirkuliuoja į ankstesnę pakopą, grafinis skaičiavimo metodas: *a* – esant bendrai (vienodai) pusiausvyros linijai ir kintamai recirkuliuojamojo srauto daliai R; *b* – esant skirtingoms kiekvienos pakopos pusiausvyros linijoms ir recirkuliuojamojo srauto dalims R

Kiekvienai kaskados pakopai gali būti būdingos tiek pusiausvyros linijos, tiek recirkuliuojamojo srauto dalys R_n, t. y. darbo linijos. Šio atvejo grafinis skaičiavimas pavaizduotas 24.19 pav., *b*. Pirmajai kaskados pakopai nubrai-

žomos pusiausvyros linijos, o parinkus R_1 vertę – ir darbo linijos. Po to fiksuojama pirmoji teorinė pakopa ir apskaičiuojamos perskiriamojo komponento koncentracijos iš pirmosios pakopos ištekančiuose srautuose. Tada brėžiamos antrosios teorinės pakopos pusiausvyros linijos ir, parinkus R_2 vertę, – darbo linijos. Užfiksavus antrąją pakopą, apskaičiuojamos perskiriamojo komponento koncentracijos iš antrosios pakopos ištekančiuose srautuose. Skaičiavimas kartojamas, iki pasiekiamos sąlygoje nurodytos perskiriamojo komponento koncentracijos iš kaskados ištekančiuose srautuose arba iki šios koncentracijos skiriasi tik nurodyta paklaida.

24.6. Membranų valymo būdai

Membranų eksploatavimo trukmė, be kitų veiksnių, labai priklauso ir nuo to, kaip buvo paruoštas tirpalas prieš tiekiant jį į membraninį aparatą, ir nuo parinktos darbo schemos. Užsiteršusių membranų pradinėms savybėms atkurti naudojami įvairūs valymo būdai.

Mechaninio valymo metu užsiteršęs paviršius valomas muilinu šepetėliu, kempine. Taip valomos tik vamzdinės membranos. Plokščiakamerių aparatų membranoms valyti galima naudoti kietus rutuliukus, kurių medžiagos tankis artimas perdirbamojo tirpalo tankiui. Mikroporinės membranos šiuo būdu valomos retai, nes labai lengva pažeisti filtruojamąjį paviršių.

Valant hidrodinaminiu būdu membrana yra veikiama atgaline pulsuojančia vandens ar tirpalo srove; kanalas plaunamas dujų ir skysčio emulsija. Valymo efektyvumui pagerinti padidinamas srauto turbulentiškumas; membrana atgaline kryptimi prapučiama suslėgtu oru arba išplaunama filtratu; staigiai sumažinamas slėgis.

Hidrodinaminiai būdai paprasti ir pigūs, tačiau jais pašalinamos tik netvirtai su membrana sukibusios nuosėdos.

Fiziškai valant membrana yra veikiama įvairiais laukais (elektriniu, magnetiniu, akustiniu). Tai perspektyvus metodas, nes membranas galima valyti nestabdant membraninio proceso.

Valant cheminiu būdu membranos plaunamos įvairiais reagentais (pavyzdžiui, silpnais vandenilio chlorido, citrinos, rūgštynių rūgščių, sodos tirpalais). Tai palyginti brangus metodas, nes naudojami cheminiai reagentai, be to, jis netinka chemiškai neatsparioms membranoms valyti.

25 DALIS

DŽIOVINIMAS

25.1. Džiovinimo proceso teorijos pagrindai

Drėgmės pašalinimo iš medžiagos procesas vadinamas džiovinimu. Chemijos ir maisto bei kitose pramonės šakose džiovinimo procesas plačiai taikomas, kai medžiagoje esanti drėgmė blogina jos fizikines chemines savybes, kai drėgmę būtina šalinti dėl tolesnio medžiagos apdorojimo ypatumų ar tiesiog kai norima sumažinti transporto išlaidas. Džiovinamos ne tik kietos drėgnos medžiagos, bet ir suspensijos, kuriose drėgmės yra gerokai daugiau nei kietosios medžiagos.

Medžiagose esanti drėgmė gali būti pašalinta šiais metodais: 1) *mechaniniais* (presuojant, filtruojant, centrifuguojant ir kt.), 2) *fizikiniais cheminiais* (sugeriant drėgmę higroskopinėmis medžiagomis, pvz., kalcio chloridu, sieros rūgštimi), 3) *šiluminiais* (išgarinant drėgmę ir garus pašalinant nuo medžiagos paviršiaus).

Mechaninis drėgmės pašalinimo metodas yra paprasčiausias ir pigiausias, tačiau po jo medžiagoje neišvengiamai lieka šiek tiek drėgmės. Fizikinis cheminis metodas dažniausiai taikomas, kai norima, kad išdžiovinta medžiaga, ilgiau laikoma patalpoje, neadsorbuotų iš aplinkos drėgmės. Plačiausiai tiek buityje, tiek pramonėje naudojamas šiluminis metodas, kurį ir nagrinėsime šioje dalyje. Džiovinamajai medžiagai šilumą galima perduoti konvekciniu, radiaciniu, kontaktiniu ir mišriuoju (konvekciniu-radiaciniu) būdais.

Džiovinimo proceso metu iš kietos medžiagos pašalinama ne tik drėgmė, bet ir prie jos paviršiaus susikaupę garai. Medžiagai džiūstant, vyksta difuzinis procesas, t. y. drėgmė garuoja (difunduoja) nuo medžiagos paviršiaus į aplinką ir difunduoja iš vidinių sluoksnių į paviršių.

Konvekciniu būdu medžiaga džiovinama sauso (šilto) oro arba dūmų srautu. Džiovinimo agentas perduoda dalį savo šilumos džiovinamajai medžiagai, todėl suintensyvėja drėgmės garavimo procesas, o susidarę vandens garai su tuo pačiu srautu pašalinami į aplinką.

Taikant *radiacinį* džiovinimo būdą, šiluminė energija (infraraudonieji spinduliai) džiovinamajai medžiagai perteikiama spinduliavimo būdu nuo įkaitusių paviršių ir kt.

Džiovinant *kontaktiniu* būdu, medžiaga šildoma prie jos priglaustu įkaitintu paviršiumi. Šis būdas plačiai taikomas plonasluoksnėms medžiagoms džiovinti. Džiovinant kontaktiniu elektriniu būdu, gaminiai gali būti įjungiami į kintamosios srovės grandinę arba šildomi elektrinio šildytuvo varžomis. Džiovinant šiuo būdu nereikia specialių džiovinimo kamerų, gerai išdžiovinami stambūs fasoniniai gaminiai.

Džiovinant *dielektriniu* būdu, medžiaga, kaip dielektrikas, dedama į aukštojo dažnio elektromagnetinį lauką. Dėl aukštojo dažnio srovės, t. y. elektromagnetinių virpesių, ima virpėti džiovinamosios medžiagos molekulės, todėl medžiaga džiūsta tolygiai.

Kartais reikia džiovinti užšaldytas medžiagas arba esant dideliam vakuumui. Šis džiovinimo būdas vadinamas *sublimavimu*. Taip džiovinant drėgmė pasišalina aplenkdama skystąją fazę. Pramonėje dažniausiai džiovinama konvekciniu ir radiaciniu būdais.

Džiovinimo procesas apibūdinamas džiovinimo statika ir kinetika. Džiovinimo statika nusako ryšį tarp medžiagos ir džiovinimo agento, arba džioviklio, pradinių ir galinių parametrų, t. y. čia nagrinėjami medžiagų ir šilumos balansai. Remiantis sudarytomis balansų lygtimis, apskaičiuojamas išdžiovintos medžiagos drėgnis, džioviklio ir šilumos sąnaudos ir kt. Džiovinimo kinetika nusakomas ryšys tarp medžiagos drėgnio kitimo laikui bėgant ir kitų proceso parametrų. Pagal atitinkamas lygtis galima apskaičiuoti džiovinimo trukmę ir režimą.

Cheminėje technologijoje dažniausiai taikomas konvekcinis kietųjų medžiagų džiovinimas įkaitintu dujiniu džioviklių. Drėgmės pašalinimo iš medžiagos procesas yra sudėtinis drėgmės ryšių su džiovinamąja medžiaga nutraukimo, jos migracijos kietoje medžiagoje iš giluminių sluoksnių link medžiagos paviršiaus, agregatinės būsenos iš skystosios į garų fazę pasikeitimas ir drėgmės garų pasišalinimas iš paviršinio sluoksnelio į dujinį džioviklį. Drėgmė su džiovinamąja medžiaga gali būti susijusi stipriais cheminiais arba silpnesniais fizikiniais cheminiais bei fizikiniais mechaniniais (adsorbciniu, osmosiniu ir kapiliariniu) ryšiais, kuriems nutraukti reikalingas tam tikras energijos kiekis. Keičiantis drėgmės agregatinei būsenai iš kondensuoto skysčio į garų, taip pat sunaudojama energija ne tik ryšiams tarp agreguotų skysčio molekulių nutraukti, bet ir garų plėtimosi darbui atlikti (garų susidarymo šiluma). Džiovinimo metu lygiagrečiai vyksta masės ir šilumos pernašos procesai.

Bendros energijos sąnaudos E_b drėgmei pašalinti džiovinimo procese apskaičiuojamos taip:

$$E_b = r + E_r + T \cdot \Delta S; \qquad (25.1)$$

čia r – laisvojo vandens garų susidarymo šiluma, J/kg; E_r – energija, reikalinga vandens ryšiams su džiovinamąja medžiaga nutraukti, J/kg; $T \cdot \Delta S$ – entropinių ryšių energija, J/kg.

Entropinių ryšių energija dažniausiai sudaro nedidelę bendrosios energijos dalį, nes ji siejama su osmosinėmis jėgomis susijusia drėgme, tačiau kai kuriais atvejais, pavyzdžiui, sąveikaujant vandeniui su biopolimerų baltymais, kai vyksta ne tik jų tirpimo, brinkimo, bet ir „stiklėjimo" procesai, ši energijos dalis gali būti net lemiama.

Drėgmės ryšio energija E_r gali būti apibūdinama darbu A, kuris yra reikalingas vandens masės vienetui (kg, mol) atskirti nuo sauso medžiagos karkaso izoterminiame grįžtamajame procese:

$$E_r = A = -\Delta F = R \cdot T \cdot ln(p_s/p_w) = R \cdot T \cdot ln\varphi; \qquad (25.2)$$

čia ΔF – laisvosios paviršinės energijos pokytis nutrūkstant vandens ryšiams su medžiagos karkasu; R – džioviklio dujų konstanta; p_s – laisvojo vandens sočiųjų garų slėgis, esant medžiagos temperatūrai T; p_w – dalinis pusiausvirasis vandens garų slėgis pasienio sluoksnelyje virš drėgnos medžiagos paviršiaus bet kurioje aplinkoje – ore, inertinėse dujose ar vakuume; $\varphi = p_s/p_w$.

Santykis φ vadinamas *vandens aktyvumu.* Vandens garų pasienio sluoksnelyje virš medžiagos dalinis slėgis p_w priklauso nuo vandens ryšio su medžiaga stiprumo: kuo stipriau vanduo susijungęs su medžiaga, tuo mažesnis p_w ir atvirkščiai – laisvo, nesujungto vandens $p_s = p_w$, o tada $\varphi = 1$ ir $E_r = 0$.

Džiovinimo proceso metu mažėjant medžiagoje laisvosios drėgmės kiekiui, didėja E_r dalis bendrose džiovinimo energijos sąnaudose, nes medžiagoje didėja dalis vandens, sujungto stipresniais ryšiais su medžiaga (adsorbcinio vandens, vandens mikrokapiliaruose).

Kadangi džiovinimo metu E_r yra kintamas dydis, tai inžineriniuose skaičiavimuose E_r nustatoma pagal galutinę medžiagos drėgmę arba apskaičiuojama integralinė ryšio energija:

$$E_r = \int_o^w \Delta F d_w; \qquad (25.3)$$

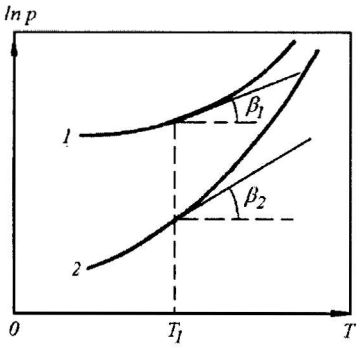
čia $\Delta F = -R \cdot T \cdot ln\varphi$.

Šiluminiuose skaičiavimuose į E_r galima neatsižvelgti tik tais atvejais, kai galutinė medžiagos drėgmė yra gerokai didesnė už maksimalią higroskopinę.

Tariant, kad džiovinama esant pastoviai temperatūrai T, iš (25.2) lygties nustatoma priklausomybė tarp sujungto vandens garų slėgio p_w, temperatūros ir garų susidarymo šilumos r:

$$p_w = p_s \cdot exp\left(-\frac{r}{R \cdot T}\right); \qquad (25.4)$$

čia p_s – laisvojo vandens sočiųjų garų slėgis esant temperatūrai T.



25.1 pav. Laisvojo (*1*) ir sujungtojo (*2*) vandens garų slėgio priklausomybė nuo džiovinamosios medžiagos temperatūros

Nagrinėjant džiovinimo procesus, būtina prisiminti tai, kad virš laisvojo vandens paviršiaus susidarančių vandens garų ir anksčiau minėtomis ryšio jėgomis sujungto vandens slėgis bet kurioje džiovinimo temperatūroje T_1 yra skirtingas (25.1 pav.). Kylant temperatūrai šis slėgių skirtumas mažėja ($\beta_1 > \beta_2$).

Dėl skirtingos vandens ryšio su džiovinamąja medžiaga formos bei prigimties skiriasi ryšio energijos dydis. Stipriausiai su džiovinamąja medžiaga vanduo sujungiamas cheminiu ryšiu, kai jis įsiterpia į medžiagų struktūrą OH^- jonų pavidalu arba kai susidaro kristalohidratai. Kristalohidratuose vandens kiekis gali būti griežtai apibrėžtas arba neapibrėžtas. Pirmojo tipo kristalohidratuose vienai kietosios medžiagos molekulei tenka tik tam tikras vandens molekulių skaičius, kuris gali būti skirtingas, esant įvairioms temperatūroms, pvz., Na_2CO_3 sudaro šiuos kristalohidratus: dekahidratą $Na_2CO_3 \cdot 10H_2O$ (t = *-2,1...+32,0* °C), heptahidratą $Na_2CO_3 \cdot 7H_2O$ (t = *32,0...35,4* °C) ir monohidratą $Na_2CO_3 \cdot H_2O$ (t = *35,4...105,5* °C); esant temperatūrai, didesnei už 105,5 °C, stabilus yra bevandenis Na_2CO_3 arba kalcinuotoji soda. Antrojo tipo kristalohidratuose vandens molekulių skaičius, tenkantis vienai kietosios medžiagos molekulei, yra neapibrėžtas ir kinta priklausomai nuo aplinkoje esančių vandens garų slėgio ir aplinkos temperatūros. Druskų kristalohidratuose vandens molekulės išsidėsto aplink katijoną ir yra sujungtos elektrostatiškai, o su kompleksus sudarančiais katijonais jos sujungiamos koordinaciniais ryšiais (anksčiau jie buvo vadinami donoriniais-akceptoriniais ryšiais).

Joninio ryšio energija yra labai didelė: $E_r = 6{,}7 \cdot 10^5 ... 1{,}5 \cdot 10^7$ J/mol, o nutraukus joninius OH^- ryšius, pasikeičia medžiagos struktūra. Pasišalinant vandens molekulėms iš kristalohidratų, kietosios medžiagos struktūra gali ir nepasikeisti (vandens molekulės užpildo tarpkristalines poras ir vidines kristalų struktūros tuštumas), tačiau ir šiuo atveju ryšiui nutraukti reikia nemaža energijos, pvz., esant 25 °C temperatūrai, vario sulfato pentahidrato $CuSO_4 \cdot 5H_2O$

ryšio energija $E_r = 8{,}4 \cdot 10^3$ J/mol, o vario sulfato monohidrato $CuSO_4 \cdot H_2O$ – $E_r = 0{,}27 \cdot 10^3$ J/mol. Dažniausiai džiovinimo procese chemiškai sujungtas vanduo nepašalinamas, tik retais atvejais džiovinimo metu vanduo gali būti pašalinamas iš kristalohidratų.

Adsorbciniais ryšiais sujungtas vanduo susidaro kietosios medžiagos paviršiui adsorbuojant vandens garų molekules iš jį supančios dujinės aplinkos. Vykstant vandens garų adsorbcijai, kietojo kūno paviršiuje (įskaitant ir vidinį kapiliarų bei porų paviršių) susidaro monomolekulinis adsorbuoto vandens sluoksnelis, kuriame esančios vandens molekulės yra stipriame tarpmolekulinių ryšio jėgų lauke, todėl šiame sluoksnelyje padidėja vandens tankis ir pasikeičia kitos vandens savybės (šis vanduo netirpina elektrolitų, pasižymi tampraus kietojo kūno savybėmis ir t. t.). Vykstant polimolekulinei adsorbcijai, kiti vandens sluoksneliai sujungiami ne taip stipriai ir jų savybės pamažu artėja prie laisvojo vandens savybių.

Poringose džiovinamose medžiagose polimolekulinis adsorbcinis sluoksnis yra glaudžiai susijęs su drėgmės pasišalinimu *iš kapiliarų*. Pagrindinė kapiliaruose esančio vandens dalis yra laisva, nesujungta, išskyrus ploną polimolekulinį adsorbciniais ryšiais sujungtą vandens sluoksnelį. Tačiau dėl kapiliarinių jėgų poveikio vandens paviršius kapiliare gali būti įgaubtas arba išgaubtas ir vandens garų slėgis kapiliare gali skirtis nuo jų slėgio virš plokščiojo paviršiaus. Vandens garų slėgio padidėjimas arba sumažėjimas priklauso nuo kapiliaro spindulio r_k dydžio ir gali būti apskaičiuojamas pagal Tomsono ir Kelvino lygtį:

$$p_r = p_s \cdot exp\left(-\frac{2 \cdot \sigma \cdot \rho_g \cdot cos\,\theta}{r_k \cdot p_s \cdot \rho_{sk}}\right); \qquad (25.5)$$

čia p_r – vandens garų slėgis virš menisko; p_s – sočiųjų laisvojo vandens garų slėgis garavimo temperatūroje; σ – vandens paviršiaus įtempis; ρ_g – sočiųjų vandens garų tankis; θ – drėkinimo kampas; r_k – kapiliaro spindulys; ρ_{sk} – vandens tankis.

Garų slėgio padidėjimas arba sumažėjimas turi pastebimą įtaką tik tuo atveju, kai $r_k < 10^{-7}$ m. Tokio dydžio kapiliarai būdingi nedidelės drėgmės smulkiadispersėms kietosioms medžiagoms arba labai smulkiais lašeliais išpurkštiems skysčiams. Kapiliaruose, kurių $r > 10^{-7}$ m, garų slėgis virš menisko yra beveik lygus jų slėgiui virš skysčio plokščiojo paviršiaus. Tokie kapiliarai vadinami makrokapiliarais.

Osmosinėmis jėgomis sujungtas vanduo medžiagose, kurios pasižymi puslaidžių membranų arba pertvarų savybėmis, pvz., želatina, įvairios tešlos. Dėl osmosinių jėgų vanduo iš mažesnės koncentracijos tirpalo gali pereiti į medžiagą, kurioje koncentracija yra didesnė. Pagal Raulio dėsnį santykinis

sočiųjų vandens garų slėgio sumažėjimas virš idealių praskiestų tirpalų yra lygus molinei tirpale ištirpusios medžiagos daliai:

$$\frac{p_s - p}{p_s} = 1 - n_o; \qquad (25.6)$$

čia n_o – molinė vandens dalis tirpale.

Osmosinio ryšio energija apskaičiuojama pagal lygtį

$$-\Delta F = T \cdot \Delta S = -R \cdot T \cdot ln(n_o). \qquad (25.7)$$

Jei medžiagoje vyrauja osmosinio ryšio drėgmė, tai ši medžiaga vadinama koloidine. Tokios medžiagos džiūdamos traukiasi.

Jei drėgmė medžiagose yra sujungta kapiliarinėmis jėgomis, tai tokios medžiagos vadinamos *kapiliariškai poringomis* (pvz., silikagelis, aktyvintosios anglys, degtas molis ir pan.). Pašalinus drėgmę, šios medžiagos dažnai tampa trapios, neelastingos, įgeriančios kiekvieną drėkiklį. Kapiliariškai poringos gali būti ir kai kurios koloidinės medžiagos, kurių kapiliarų sienelės yra elastingos ir kurios įgerdamos skystį brinksta, o džiūdamos – traukiasi (molis, durpės, maisto produktai, kai kurios polimerinės medžiagos, tokios kaip polibutilmetakrilatas arba polivinilbutiralis). Šiose medžiagose skystis sujungtas įvairiomis ryšio formomis, būdingomis tiek koloidinėms, tiek kapiliariškai poringoms medžiagoms.

Medžiagoje sujungto vandens kiekis nustatomas pagal visiškai sausos medžiagos drėkinimo šilumą arba pagal elektrines fizikines savybes (laidumą elektrai, dielektrinius nuostolius ir pan.). Skysčių, sujungtų su medžiaga adsorbcinėmis arba kapiliarinėmis jėgomis, elektrinės fizikinės savybės ryškiai skiriasi.

Klasifikuojant džiovinamas medžiagas, svarbu taip pat jų agregatinė būsena, kuri dažnai nulemia masės ir šilumos pernašos procesų eigą bei džiovinimo būdą. Pagal agregatinę būseną džiovinamos drėgnos medžiagos gali būti kietos masyvios, birios, tešlų pavidalo ir skystos.

25.2. Džiovinamos medžiagos pusiausvyros būsenos charakteristikos

Džiovinimo proceso metu drėgna medžiaga tiesiogiai kontaktuoja su aplinka, kurioje nuolat yra tam tikras drėgmės kiekis ir į kurią pereina iš medžiagos pasišalinę garai. Fizikine prasme džiovinimas yra šilumos ir masės mainų procesas, kurio metu dėl šilumos poveikio drėgmė iš gilesnių medžiagos sluoksnių skverbiasi į viršutinius, garuoja ir pasiskirsto aplinkoje. Džiovinamoji medžiaga pagal turimą drėgmės kiekį stengiasi pasiekti pusiausvyrą su drėgna aplinka. Todėl medžiaga negali būti išdžiovinta iki absoliučiai sausos būsenos. Likutinis pusiausvirasis medžiagos drėgnis priklauso nuo daugelio

parametrų, bet pagrindiniai yra aplinkos temperatūra ir joje esančių garų kiekis bei pačios medžiagos hidrofilinės savybės.

Kai vandens garais neprisotintų šildančių dujų srovė teka virš drėgnos medžiagos paviršiaus, dujų drėgnis didėja dėl medžiagos paviršiuje esančio skysčio garavimo. Tačiau garuojančio skysčio temperatūra mažėja, nes garų susidarymui sunaudojama šiluma. Ši šiluma skysčiui suteikiama iš dujų srauto. Nusistovėjus pusiausviriesiems šilumos pernašos iš dujinės aplinkos ir medžiagos paviršio skysčio garavimo greičiams, skystyje nusistovi tam tikra temperatūra, kuri vadinama šlapiojo termometro temperatūra ir žymima t_d.

Šlapiojo termometro temperatūra dažniausiai nustatoma išmatavus drėgnu skudurėliu apvynioto termometro rutuliuko temperatūrą, nusistovėjus šilumos ir masės pernašos pusiausvyrai.

Šilumos pernašos nuo dujų į skystį arba džiovinamą medžiagą greitis, arba šilumos srautas, J/s; W, gali būti išreiškiamas lygybe

$$q = k_c \cdot S \cdot (t_a - t_d); \tag{25.8}$$

čia q – šilumos srautas; k_c – šilumos pernašos konvekcija koeficientas; S – fazių sąlyčio paviršiaus plotas (džiovinamos medžiagos paviršaus plotas); t_a – dujų (oro) temperatūra; t_d – medžiagos paviršinio skysčio temperatūra.

Skystis garuodamas nuo džiovinamos medžiagos paviršiaus difunduoja į dujinę aplinką dėl jų koncentracijos skirtumo ($c_s - c_a$), t. y. garų koncentracijos c_s sluoksnelyje prie skysčio paviršiaus, kuri, nusistovėjus pusiausvyrai, atitinka sočiųjų vandens garų kiekį temperatūroje t_d, ir vandens garų koncentracijos c_a dujinėje fazėje (ore), priklausančios nuo dalinio vandens garų slėgio temperatūroje t_a. Tada vandens garavimo greitis

$$v_g = k_D \cdot S \cdot (c_s - c_a); \tag{25.9}$$

čia k_D – vandens garų masės pernašos koeficientas.

Vandens garų koncentracijos c_s ir c_a gali būti išreikštos daliniais slėgiais p_s ir p_a arba juos atitinkančiais oro drėgniais x_s ir x_a. Palyginus (25.8) bei (25.9) lygybes, gaunama ši priklausomybė:

$$x_s - x_a = \frac{k_c}{k_D \cdot \rho_a \cdot r} \cdot (t_a - t_d); \tag{25.10}$$

čia x_s – oro sotusis drėgnis, esant temperatūrai t_d; x_a – aplinkos oro drėgnis, esant temperatūrai t_a; k_c – šilumos pernašos konvekcija koeficientas; k_D – vandens garų masės pernašos koeficientas; ρ_a – oro tankis, esant temperatūrai t_a; r – vandens garų susidarymo šiluma, esant temperatūrai t_d.

Tam, kad nusistovėtų pastovūs šilumos pernašos ir garų difuzijos greičiai (pusiausviroji būsena), oro ir vandens sistemoje santykis $k_c/(k_D \cdot \rho_a)$ turi būti apie 1,0 kJ/(kg·K), o oro ir organinių skysčių sistemose – 1,5...2,0 kJ/(kg·K).

Šlapiojo termometro temperatūra priklauso tik nuo oro temperatūros ir jo drėgnio. Ji nustatoma apvyniojus termometro rutuliuką skudurėliu, kurio kitas galas įmerktas į vandenį, ir dėl kapiliarinių jėgų poveikio skudurėlis yra nuolat drėkinamas. Garuojant nuo skudurėlio paviršiaus vandens garams, pažemėja oro sluoksnelio, kuris liečiasi su drėgnu skudurėlio paviršiumi, temperatūra, nes šis sluoksnelis atiduoda šilumą vandeniui išgarinti. Todėl drėkinamu skudurėliu apvynioto termometro rodoma temperatūra visada yra mažesnė už nesotaus aplinkos oro temperatūrą t_a, kurią rodo sausasis termometras.

Kaip jau buvo minėta, nustatant šlapiojo termometro temperatūrą, nei dujų drėgnis, nei jų temperatūra negali pastebimai keistis. Tačiau jei skysčio ir dujų fazių sąlyčio paviršius yra didelis, o garavimo greitis ir trukmė – taip pat dideli, tai dujos gali prisisotinti skysčio garų ir abiejų fazių temperatūros išsilygins. Tokios sąlygos gali susidaryti begalinio aukščio termiškai izoliuotoje kolonoje, į ją iš viršaus uždaru ciklu tiekiant temperatūros t_s skystį, o į apatinę kolonos dalį tiekiant tam tikros temperatūros t bei drėgnio x dujas. Iš kolonos ištekančių dujų srauto temperatūra sumažėja iki t_s, o jų drėgnis tampa x_s (sočiųjų garų slėgį atitinkantis dujų drėgnis). Ši pusiausviroji temperatūra yra vadinama *adiabatine soties temperatūra.*

Daugumos *vandens garų* sistemų šlapiojo termometro ir adiabatinė soties temperatūros yra labai artimos. Tačiau *oro ir organinių skysčių* (etanolio, *n*-butanolio, benzeno, tolueno, anglies tetrachlorido ir kt.) sistemų, kurių šilumos pernašos koeficientas k_c yra gerokai didesnis už garų masės difuzijos koeficientą k_D, *šlapiojo termometro temperatūra yra aukštesnė už adiabatinę soties temperatūrą.*

Sauso ir šlapio termometrų rodomas temperatūrų skirtumas $(t_0 - t_d)$ vadinamas *psichrometriniu skirtumu.* Jis tuo didesnis, kuo sausesnis aplinkos oras, nes tuo didesnis yra ore esančių vandens garų slėgio p_g ir skudurėlio paviršiuje esančių t_d temperatūros sočių garų slėgio p_m skirtumas $(p_m - p_g)$. Taigi, žinant psichrometrinį skirtumą, galima spręsti apie oro sausumą, t. y. apie ore esančių vandens garų kiekį, ir, naudojantis lentelėmis, nustatyti oro santykinį drėgnį (žr. 25.1 lent.). Jeigu tam tikroje temperatūroje oras bus visiškai prisotintas vandens garų, tai garų slėgis aplinkos ore bus lygus sočiųjų garų slėgiui drėgno skudurėlio paviršiuje. Vanduo nuo jo paviršiaus nebegaruos, o sauso ir šlapio termometrų rodmenys bus vienodi, t. y. psichrometrinis skirtumas bus lygus nuliui.

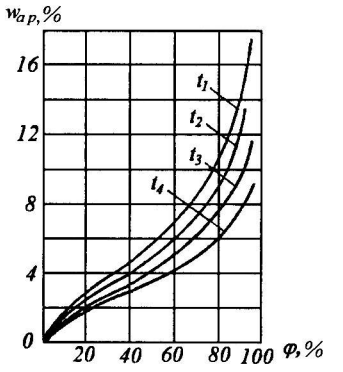
Kad vanduo garuotų, jo garų slėgis p_m džiovinamosios medžiagos paviršiuje turi būti didesnis už vandens garų slėgį p_g aplinkoje, t. y.

$$p_m > p_g . \qquad (25.11)$$

Garavimas, taigi ir džiovinimas, intensyvėja didėjant slėgiui p_m, kuris yra tuo didesnis, kuo drėgnesnė medžiaga ir aukštesnė džiovinimo temperatūra. Slėgio p_m dydis priklauso ir nuo ryšio tarp drėgmės ir medžiagos stiprumo.

Džiūstant medžiagai, po tam tikro laiko pasiekiama drėgmės mainų pusiausvyra tarp medžiagos ir aplinkos, t. y.

$$p_m = p_g \,. \qquad (25.12)$$



25.2 pav. Pusiausvirojo absoliučiojo drėgnio kreivės ($t_1 < t_4$): $w_{a.p}$ – medžiagos pusiausvirasis drėgnis; φ – oro santykinis drėgnis

Šią būseną atitinka tam tikra pastovi medžiagos drėgmė, kuri vadinama *pusiausviruoju drėgniu*. Toliau medžiaga nebedžiūsta. Pusiausvirasis drėgnis priklauso nuo aplinkos oro parametrų, drėgmės ryšio su medžiaga ir medžiagos savybių (25.2 pav.). Pvz., orasausių durpių pusiausvirasis drėgnis visada bus didesnis už toje pačioje aplinkoje esančių anglių pusiausvirąjį drėgnį. Atvėsus ir orui tapus drėgnesniam, medžiagos pusiausvirasis drėgnis padidėja. Vadinasi, medžiaga gali ne tik džiūti, garuojant drėgmei, bet tam tikromis sąlygomis (t. y. kai garų slėgis ore didesnis už garų slėgį medžiagos paviršiuje) ir adsorbuoti drėgmę.

Laisvąja drėgme vadiname tą drėgmės dalį, kuri pašalinama džiovinant. Jos garavimo greitis nusakomas garavimo nuo laisvojo (atvirojo) paviršiaus dėsniu: garų slėgis medžiagos paviršiuje, esant be galo mažam džiūvimo (garavimo) greičiui, lygus sočiųjų garų slėgiui toje pačioje temperatūroje.

Kai garų slėgis džiovinamos medžiagos paviršiuje tampa mažesnis už sočiųjų garų slėgį toje temperatūroje, likusi medžiagoje drėgmė vadinama *higroskopine*. Ji sunkiau pašalinama džiovinimo metu.

Higroskopiniu tašku vadinamas tas medžiagoje esantis drėgmės kiekis, kuris yra pusiausviras su atmosferos drėgme, kai ji visiškai prisotinta vandens garų (t. y. pusiausvirasis drėgmės kiekis, kai $\varphi = 100$ %). Šis taškas rodo ribinį medžiagos drėgnį, kai vandens garų dalinis slėgis ore p_g ir medžiagos paviršiuje p_m lygus sočiųjų garų daliniam slėgiui p_s tos temperatūros ore: $p_g = p_m = p_s$.

Jeigu medžiagos drėgmės kiekis yra didesnis už drėgmės kiekį, atitinkantį higroskopinį tašką, tai medžiaga yra drėgna, ir jos paviršiuje esantys vandens garai visiškai prisotinti ($p_m = p_s$). Todėl medžiaga džius nepriklausomai nuo aplinkos parametrų, kol aplinka prisisotins vandens garų.

25.1 lentelė. Psichrometrinė lentelė pagal šlapią termometrą

t_d, °C	Sauso ir šlapio termometrų rodmenų												
	0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0
0	100	90	81	73	64	57	50	43	36	31	26	20	16
1	100	90	82	74	66	59	52	45	39	33	29	23	19
2	100	90	83	75	67	61	57	47	42	35	31	26	23
3	100	90	83	76	69	63	56	49	44	39	34	29	20
4	100	91	84	77	70	64	57	51	46	41	36	32	28
5	100	91	85	78	71	65	59	54	48	43	39	34	30
6	100	92	85	78	72	68	61	56	50	45	41	35	33
7	100	92	86	79	73	67	62	57	52	47	43	39	35
8	100	93	86	80	74	68	63	58	54	49	45	41	37
9	100	93	86	81	75	70	65	60	55	51	47	43	39
10	100	94	87	82	76	71	66	61	57	53	48	45	41
11	100	94	88	82	77	72	67	62	58	55	50	47	43
12	100	94	88	82	78	73	68	63	59	56	52	48	44
13	100	94	88	84	78	73	68	63	59	57	53	50	46
14	100	94	89	83	79	74	70	66	62	58	54	51	47
15	100	94	89	84	80	75	71	67	63	59	55	52	49
16	100	95	90	84	80	75	72	67	64	60	57	53	50
17	100	95	90	84	81	76	73	68	65	61	58	54	52
18	100	95	90	85	81	76	74	69	66	62	59	56	53
19	100	95	91	85	82	77	74	70	66	63	60	57	54
20	100	95	91	86	82	78	75	71	67	64	61	58	55
21	100	95	91	86	83	79	75	71	68	65	62	59	56
22	100	95	91	87	83	79	76	72	69	65	63	60	57
23	100	96	91	87	83	80	76	72	69	66	63	61	58
24	100	96	92	88	84	80	77	73	70	67	64	62	59
25	100	96	92	88	84	81	77	74	70	68	65	63	59
26	100	96	92	88	85	81	78	75	72	69	66	63	61
27	100	96	92	89	85	82	78	75	72	69	67	64	61
28	100	96	92	89	85	82	79	76	73	70	67	65	62
29	100	96	93	89	86	82	79	76	73	70	68	65	63
30	100	96	93	89	86	83	79	76	74	71	68	65	63
31	100	96	93	89	86	83	79	76	74	71	68	65	63
32	100	96	93	89	86	83	79	76	74	71	68	65	63
33	100	96	93	89	86	83	79	76	74	71	68	66	64
34	100	96	93	89	86	83	79	76	74	71	69	67	65
35	100	96	93	89	86	83	79	76	74	72	70	68	66
36	100	96	93	89	86	83	80	77	75	72	70	68	66
37	100	96	93	89	86	83	81	79	77	74	72	69	67
38	100	96	93	90	87	84	82	79	77	74	72	69	67
39	100	96	93	90	88	85	82	80	77	75	72	70	68
40	100	97	94	91	88	85	83	80	78	75	73		
41	100	97	94	91	88	85	83	80	78				
42	100	97	94	91	88	85	83						
43	100	97	94	91	88								
44	100	97	94										
45	100												

skirtumas t_s-$t_š$													
6,5	**7**	**7,5**	**8**	**8,5**	**9**	**9,5**	**10**	**10,5**	**11**	**11,5**	**12**	**12,5**	**13**
11	7	3											
16	11	7											
18	14	10											
21	17	13	10										
24	20	16	14	11									
27	23	19	17	13	10								
29	25	22	19	16	13	10							
31	28	25	22	18	15	12	10						
33	30	27	25	21	18	15	14						
35	32	29	27	24	21	18	17						
38	34	31	28	26	23	21	19						
40	36	33	30	28	25	23	20						
42	38	35	32	30	27	25	22	21					
43	40	37	34	32	29	27	24	23	21	19			
45	41	39	36	34	31	29	26	25	23	21	20		
46	43	41	37	35	33	31	28	27	25	23	21	19	
48	44	42	39	37	34	32	30	28	26	24	23	21	20
49	46	44	40	39	36	34	31	30	28	26	25	23	21
50	47	45	42	40	37	35	33	31	30	28	26	24	23
51	48	46	43	41	39	37	34	33	31	29	28	26	24
53	49	47	44	43	40	37	36	34	32	31	29	27	26
54	51	49	46	44	41	39	37	36	34	32	30	29	27
55	52	50	47	45	42	40	38	37	35	33	32	30	29
56	53	51	48	46	43	41	39	38	36	35	33	31	30
56	53	52	49	47	44	42	40	39	37	36	34	32	31
58	54	52	50	47	45	44	42	40	38	37	35	34	32
58	56	53	51	49	47	45	43	41	40	38	36	35	33
59	56	54	52	50	48	46	44	42	41	39	37	36	34
60	57	55	53	51	49	47	45	43	41	40	38	37	35
61	58	55	54	52	50	48	46	45	43	42	40	39	37
61	58	55	54	52	50	49	48	46	44	43	41	39	38
61	59	57	55	53	51	50	48	47	45	43	42	40	39
62	60	58	56	54	52	50	49	47	46	44	43		
63	61	59	57	55	53	51	50	48	46				
64	62	60	58	56	54	52	50						
64	62	60	58	56	55								
65	63	61	59										
65	63												

Jeigu medžiagos drėgmės kiekis yra mažesnis už drėgmės kiekį, atitinkantį higroskopinį tašką, tai medžiaga yra higroskopinės būsenos ir jos paviršiuje esantys vandens garai neprisotinti ($p_m < p_s$). Šiuo atveju medžiaga adsorbuoja drėgmę iš aplinkos (sorbcija). Paprastai džiovinant pašalinama tik dalis higroskopinės drėgmės.

Drėgnos medžiagos paviršiaus temperatūra (ϑ) pastovaus džiovinimo greičio periodu lygi drėgno termometro temperatūrai ($\vartheta = t_d$); higroskopinės būsenos medžiagos temperatūra aukštesnė už t_d, bet žemesnė už aplinkos temperatūrą ($t_d < \vartheta < t_a$). Medžiagos, kurios drėgmė pusiausvira, temperatūra yra tokia pat kaip ir aplinkos temperatūra ($\vartheta = t_a$). Taigi džiovinimo procesas priklauso ir nuo medžiagos, ir nuo aplinkos parametrų.

Medžiagos drėgnis paprastai reiškiamas procentais (rečiau masės dalimis). Jis skirstomas į *absoliutųjį* ir *santykinį*. Absoliutusis medžiagos drėgnis w_a yra medžiagoje esančios drėgmės kiekio W, kg, ir absoliučiai sausos medžiagos kiekio G_s, kg, santykis:

$$w_a = \frac{W}{G_s} \cdot 100 \ \%. \tag{25.13}$$

Santykinis medžiagos drėgnis w yra medžiagoje esančios drėgmės kiekio W, kg, ir drėgnos medžiagos kiekio G, kg, santykis:

$$w = \frac{W}{G} \cdot 100 \ \%. \tag{25.14}$$

Santykinis medžiagos drėgnis negali būti didesnis kaip 100 %, o absoliutusis gali būti ir didesnis. Iš absoliučiojo medžiagos drėgnio galima tiksliau spręsti apie medžiagos sausumą, nes (25.13) lygties vardiklis nekinta.

Priklausomybė tarp absoliučiojo ir santykinio medžiagos drėgnio aprašoma šiomis lygtimis:

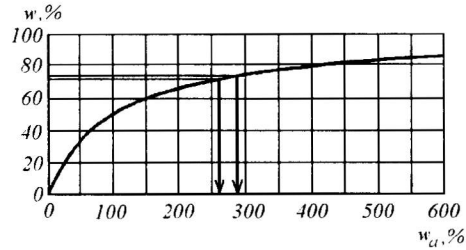
$$w = \frac{w_a \cdot 100}{100 + w_a} \ \% \tag{25.15}$$

ir

$$w_a = \frac{w \cdot 100}{100 - w} \ \%. \tag{25.16}$$

Grafiškai priklausomybė tarp šių drėgnių pavaizduota 25.3 paveiksle. Iš šiame paveiksle pateiktos kreivės pobūdžio matome, kad absoliučiojo drėgnio pokytis gerokai vaizdžiau parodo džiovinimo metu išgarinamos drėgmės kiekį, ypač esant didelėms santykinio drėgnio vertėms ($w > 70$ %), o tai dažnai

pasitaiko konvekcinėse džiovyklose. Kai santykinis drėgnis pasikeičia 2...3 %, absoliučiojo drėgnio pokytis iš tikrųjų sudaro 15...20 %.



25.3 pav. Džiovinamos medžiagos santykinio (w) ir absoliučiojo (w_a) drėgnių tarpusavio ryšys

25.3. Drėgno oro parametrai

Džiovinimo procesų metu drėgna medžiaga nuolat liečiasi su judančiu džiovikliu, todėl jo parametrai kinta priklausomai nuo medžiagos parametrų. Konvekcinio džiovinimo atveju iš džioviklio parametrų galima spręsti apie proceso eigą. Todėl labai svarbu žinoti pagrindinius drėgno oro parametrus ir jų tarpusavio ryšį. Drėgnu oru vadinamas sauso oro ir jame esančių vandens garų mišinys. Perkaitintais garais vadinami garai, kurie temperatūroje t ir slėgyje p nesikondensuoja. Drėgnas oras apibūdinamas šiais parametrais: temperatūra t, slėgiu p, tankiu ρ, santykiniu drėgniu φ, absoliučiuoju drėgniu φ_a, drėgniu x, entalpija h ir vandens garų daliniu slėgiu p_g.

Garų neprisotinto oro drėgmę sudaro perkaitinti vandens garai, todėl drėgno oro savybės nusakomos idealiųjų dujų dėsniais.

Absoliutųjį oro drėgnį φ_a sudaro vandens garų kiekis, kg, esantis 1 m^3 drėgno oro. Ore esančių garų tūris yra lygus viso mišinio tūriui. Todėl absoliutusis oro drėgnis lygus 1 m^3 vandens garų masei, arba garų tankiui ρ_g, kg/m^3.

Vėsdamas arba drėkdamas oras pamažu prisisotina vandens garų. Toliau mažinant temperatūrą arba drėkinant orą, išsiskiria drėgmės perteklius, t. y. kondensuojasi vandens garai. Tam tikroje temperatūroje orą prisotinančių vandens garų kiekis nusakomas absoliučiuoju drėgniu, prisotinančiu orą toje pačioje temperatūroje. Pastarasis yra lygus sočiųjų vandens garų 1 m^3 masei arba jų tankiui ρ_s, kg/m^3.

Santykinį oro drėgnį sudaro 1 m^3 oro esančių vandens garų kiekio (absoliučiojo drėgnio) ir to garų kiekio, kuris prisotintų orą, esant tai pačiai temperatūrai ir tam pačiam slėgiui, santykis:

$$\varphi = \frac{\rho_g}{\rho_s}. \qquad (25.17)$$

Garų tankis yra proporcingas jų daliniam slėgiui mišinyje, esant tai pačiai temperatūrai. Todėl santykinį oro drėgnį galima išreikšti slėgių santykiu:

$$\varphi = \frac{p_g}{p_s}; \qquad (25.18)$$

čia p_g – dalinis vandens garų slėgis, kai jų tankis ρ_g; p_s – sočiųjų garų slėgis, esant tai pačiai temperatūrai.

Santykinis drėgnis dažnai reiškiamas procentais ir jį galima nustatyti iš psichrometrinės 25.1 lentelės.

Džiovinant kinta virš drėgnos medžiagos esančio oro tankis ir jo absoliutusis drėgnis, nes oras atiduoda šilumą drėgmei išgarinti, todėl vėsta, sugerdamas iš medžiagos garuojančią drėgmę. Džiovinant drėgname ore esantis absoliučiai sauso oro kiekis yra pastovus. Vandens garų kiekis, tenkantis 1 kg absoliučiai sauso oro, vadinamas oro drėgniu ir žymimas x.

Oro drėgnis x, $\frac{\text{kg}_{\text{dr}}}{\text{kg}_{\text{sauso oro}}}$, apskaičiuojamas pagal šią lygtį:

$$x = \frac{G_g}{G_{s\,o}} = \frac{M_g}{M_{s\,o}} \cdot \frac{p_g}{P - p_g}; \qquad (25.19)$$

čia G_g – drėgname ore esančių vandens garų masė; $G_{s\,o}$ – tame pačiame tūryje esančio sauso oro masė; P – bendras (barometrinis) drėgno oro slėgis; M_g – vandens garų molinė masė; $M_{s.o}$ – sauso oro molinė masė.

Iš (25.18) santykio randame, kad dalinis vandens garų slėgis $p_g = \varphi \cdot p_S$. Įrašę p_g ir sauso oro ($M_{s.o} = 29$) bei vandens garų ($M_g = 18$) molinių masių vertes į (25.19) lygtį, gauname:

$$x = \frac{18}{29} \cdot \frac{\varphi \cdot p_s}{P - \varphi \cdot p_s} = 0{,}622 \cdot \frac{\varphi \cdot p_s}{P - \varphi \cdot p_s}. \qquad (25.20)$$

Ši lygtis rodo oro drėgnio priklausomybę nuo jo santykinio drėgnio.

Drėgnas oras, kaip džioviklis, apibūdinamas entalpija h, kuri lygi sauso oro ir jame esančių vandens garų entalpijų sumai:

$$h = c_{s.o.} \cdot t + x \cdot h_g; \qquad (25.21)$$

čia h – drėgno oro entalpija, J/kg$_{s.\,o}$; $c_{s.\,o}$ – sauso oro savitoji šiluma, J/(kg K); t – oro temperatūra, °C; h_g – perkaitintų vandens garų entalpija, J/kg.

Garų entalpija apskaičiuojama pagal šią lygtį:

$$h_g = r_0 + c_g \cdot t = 10^3(2493 + 1{,}97 \cdot t); \qquad (25.22)$$

čia h_g – garų entalpija, J/kg; $r_o = 2493 \cdot 10^3$ – pastovus koeficientas, apytiksliai lygus garų entalpijai, esant 0 °C (vandens garavimo šiluma), J/kg; $c_g = 1{,}97 \cdot 10^3$ – garų savitoji šiluma, J/(kg·K) (galima tarti, kad džiovinimo procese ji yra pastovi).

Įrašę h_g vertę į (25.22) lygtį ir laikydami, kad sauso oro savitoji šiluma yra pastovi (1000 J/(kg·K)), apskaičiuojame drėgno oro entalpiją, J/kg $_{s.o}$:

$$h = 1000 \cdot t + (2493 + 1{,}97 \cdot t) \cdot 10^3 \cdot x, \qquad (25.23)$$

arba

$$h = (1000 + 1{,}97 \cdot 10^3 \cdot x) \cdot t + 2493 \cdot 10^3 \cdot x. \qquad (25.24)$$

(25.24) lygties narys ($1000 + 1{,}97 \cdot 10^3 \cdot x$) lygus ($c_{s.o} + c_g \cdot x$) ir nusako drėgno oro savitąją šilumą, kai jo drėgnis x.

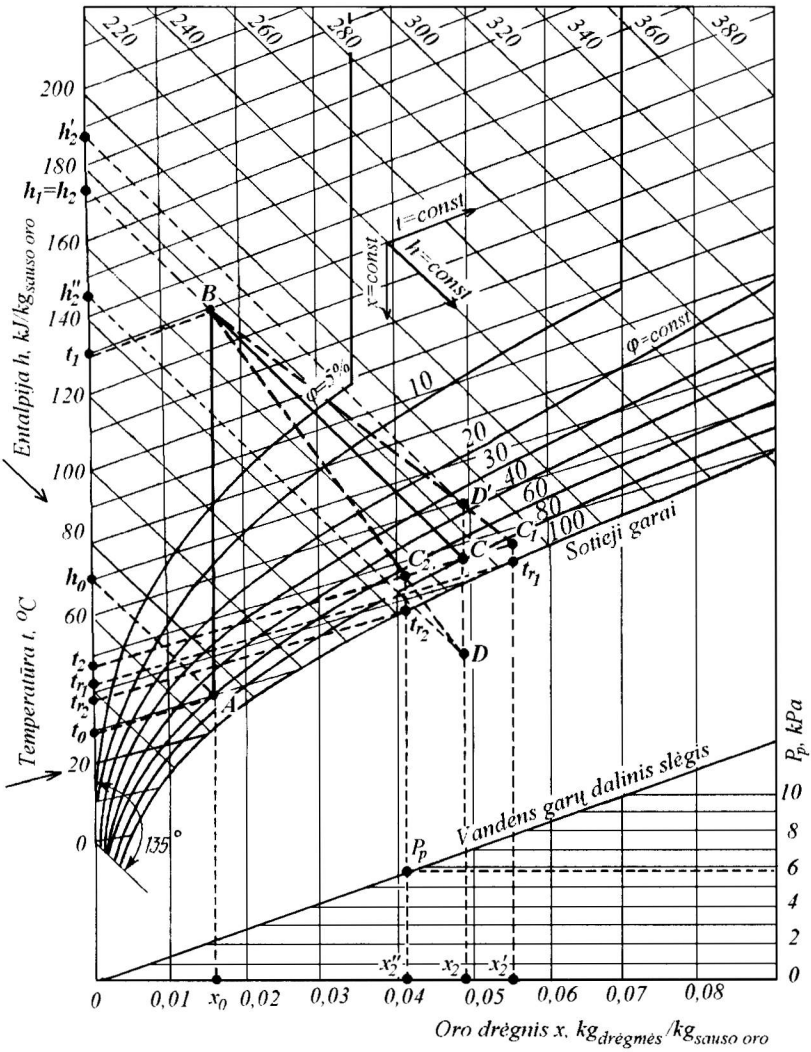
Vandens garų tankis yra mažesnis už sauso oro tankį, todėl *drėgnas oras yra lengvesnis už sausą*. Drėgno oro tūrį υ, kuriame yra 1 kg sauso oro ir x kg vandens garų, apskaičiuojame pagal dujų būsenos lygtį:

$$\upsilon = \frac{R \cdot T}{M_{s.o} \cdot p_{s.o}} = \frac{8314 \cdot T}{29 \cdot p_{s.o}} = \frac{288 \cdot T}{P - p_g}; \qquad (25.25)$$

čia υ – drėgno oro tūris, m^3/(kg sauso oro); R – universalioji dujų konstanta (8314 J/(mol·K); $M_{s.o}$ – sąlyginė sauso oro molinė masė (29); P – bendras barometrinis drėgno oro slėgis, Pa; p_g – vandens garų dalinis slėgis, Pa.

25.4. Drėgno oro *h–x* diagrama

Kaip minėta anksčiau, džiovinimo procese kaip džioviklis dažniausiai naudojamas karštas oras, nes džiovinant dūmais medžiaga užteršiama. Oro parametrų kitimui džiovinimo metu nustatyti gali būti naudojama *h–x* diagrama (25.4 pav.). Diagramoje pateikiamas ryšys tarp oro drėgnio x, entalpijos h, temperatūros t, santykinio drėgnio φ ir vandens garų dalinio slėgio ore p_p. Pastovaus drėgnio linijas ($x = const$) vaizduoja vertikalios tiesės, pastovios entalpijos linijos ($h = const$) – adiabatės vertikaliųjų linijų atžvilgiu yra pasvirusios 135° kampu. Apatinė diagramos dalis nerodoma, nes ja, skaičiuojant džiovinimą, nesinaudojama, todėl drėgnis x atidedamas papildomoje horizontaliojoje ašyje.



25.4 pav. Drėgno oro *h–x* diagrama (iki 200 °C), esant 100 kPa barometriniam slėgiui

Be minėtųjų *h* ir *x* linijų, diagramoje yra:

a) pastovios temperatūros linijos – izotermos ($t = const$), sudarytos naudojantis (25.23) lygtimi;

b) pastovaus santykinio drėgnio ($\varphi = const$) linijos, sudarytos naudojantis (25.20) lygtimi. Taške, kurio temperatūra lygi 99,4 °C, kreivės $\varphi = const$

staigiai užlinksta į viršų ir eina beveik lygiagrečiai su linijomis x = *const*. Kreivės lūžis paaiškinamas tuo, kad šioje temperatūroje užverda vanduo ir sočiųjų garų slėgis tampa lygus barometriniam slėgiui. h–x diagrama sudaryta geografinei platumai, kurioje barometrinis slėgis lygus P = *745* mm Hg ($0{,}993 \cdot 10^5$ Pa). Aišku, ir aukštesnėje temperatūroje, esant atmosferos slėgiui, sočiųjų garų slėgis p_s negali būti didesnis už barometrinį slėgį P, todėl $p_s = P$.

Santykinis drėgnis ($\varphi = p_p/p$) priklauso tik nuo garų dalinio slėgio p_p, vadinasi, tik nuo drėgnio x. Tačiau pagal tikslesnę (25.17) lygtį φ vertė priklauso ne tik nuo slėgio, bet ir nuo temperatūros.

Kreivė φ = *100* % vaizduoja didžiausią įmanomą drėgmės kiekį ore, esant bet kuriai temperatūrai.

c) ore esančių vandens garų dalinio slėgio linija, sudaryta esant įvairiam drėgniui x: dešinėje diagramos ordinatėje pagal x vertę nustatomos p_p vertės, kPa.

Naudojantis h–x diagrama (25.4 pav.), galima grafiškai išspręsti įvairius džiovinimo uždavinius.

Kad būtų paprasčiau nagrinėti džiovinimo procesą, tariame, kad aplinkos oro parametrai turi indeksą „0“; oro, pašildyto šilumokaityje-kaloriferyje, parametrai žymimi indeksu „*1*“, o iš džiovyklos šalinamo oro parametrai – indeksu „*2*“.

Džiovinimo procese vienas iš svarbesnių oro parametrų yra *rasos taškas,* kuris pasiekiamas esant temperatūrai t_r, t. y. drėgno oro temperatūrai, kurioje jis prisisotina drėgmės (φ = *100* %). Šio taško temperatūros priklausomybei nuo drėgnio x skaičiuoti galima naudoti (25.20) lygtį, kai sočiųjų vandens garų slėgis parenkamas pagal rasos taško temperatūrą:

$$x = 0{,}622 \cdot \frac{\varphi \cdot p_s}{P - \varphi \cdot p_s} = 0{,}622 \cdot \frac{1 \cdot p_s}{P - 1 \cdot p_s}.$$

Žinant oro drėgnį x, pagal šią lygtį galima apskaičiuoti p_s ir nustatyti t_r, tačiau tam reikia daug papildomų duomenų, todėl praktiniams skaičiavimams *rasos taško temperatūra* parenkama toje pačioje h–x diagramoje.

Diagramoje yra punktyrinės linijos t_d = *const*, kurios atitinka *pastovią šlapiojo termometro temperatūrą* t_d (oro adiabatinio prisotinimo temperatūrą), tačiau 25.4 pav. jos neparodytos, nes yra labai arti h = *const* linijų. Kai džiovinančiojo oro temperatūra yra 200...500 °C ir aukštesnė, tiesių t_d = *const* ir h = *const* posvyrio kampai nesutampa ir šios linijos brėžiamos atskirai. Aukštoms džiovinančiojo oro temperatūroms yra sudarytos atskiros h–x diagramos.

Jei aplinkos orą 25.4 pav. atitinka taškas A (x_0, t_0, h_0, φ_0), tai, šildant kaloriferyje, jo parametrai keičiasi: santykinis drėgnis φ mažėja, o drėgnis x_0 lieka nepakitęs. Todėl h–x diagramoje šis pašildymo procesas vaizduojamas AB linija, brėžiama iš pradinio taško A, kurio koordinatės t_0, x_0, vertikaliai

pagal liniją $x_0 = const$ iki susikirtimo su izoterma, atitinkančia pašildyto oro temperatūrą t_1 (taškas B).

Jei džiovykloje šiluma būtų sunaudojama tik drėgmei išgarinti, tai džiovinimo procesas vyktų izoentalpiškai, t. y. $h_1 = h_2$, nes oro šiluma, sunaudota vandeniui iš medžiagos išgarinti, būtų kompensuojama vandens garų kiekio ir jų fizikinės šilumos padidėjimu džiovinančiajame ore. Tokia džiovykla vadinama *teorine*, o džiovinimo procesas h–x diagramoje būtų vaizduojamas linija BC. Tačiau *realiose* džiovyklose šiluma, be išgarinimo, dar naudojama ir medžiagai bei jos gabenimo priemonėms (vagonėliams, konvejeriams ir kt.) įšildyti iki džiovinimo temperatūros bei šilumos nuostoliams padengti, todėl džiovinama, esant mažesnei entalpijai h_2'', kurios sumažėjimą atspindėtų atkarpa CD, atidedama žemyn nuo taško C. Jei į džiovyklą būtų tiekiama šilumos daugiau, nei reikia drėgmei išgarinti ir jos sąnaudos būtų didesnės už anksčiau minėtas, tai džiovinimo procesas vyktų esant entalpijai, didesnei nei teorinėje džiovykloje (taškas D' diagramoje). Kreivės $\varphi = 100\,\%$ ir linijos $x_2 = const$ susikirtimo taške t_{r1} arba t_{r2} h–x diagramoje galima nustatyti svarbų džiovinimo proceso parametrą – *rasos taško temperatūrą* t_r, kuri rodo apatinę iš džiovyklos ištekančio oro temperatūros ribą: sumažėjus oro temperatūrai iki t_r, džiovinamos medžiagos paviršiuje prasideda vandens garų kondensacija, t. y. medžiaga vėl pradeda drėkti. Iš h–x diagramos matome, kad, esant tai pačiai iš džiovyklos ištekančio oro temperatūrai t_2, oras yra gerokai daugiau prisotinamas drėgmės ($x_2' > x_2''$).

h–x diagramoje galime grafiškai rasti kiekvienos būsenos oro visus kitus parametrus, kai yra žinomi bent du.

25.5. Džiovinimo proceso vaizdavimas h–x diagramoje

Džioviklio ir šilumos sąnaudas galima nustatyti analitiniu būdu, naudojantis toliau pateiktomis šilumos ir medžiagų balanso lygtimis. Tačiau kur kas paprasčiau tai padaryti grafoanalitiniu būdu, naudojant h–x diagramą. h–x diagramoje galima pavaizduoti, kaip pasikeis į kaloriferį ir į džiovyklą nuosekliai tiekiamo oro parametrai, o paskui apskaičiuoti oro ir šilumos sąnaudas. Oro pašildymas nuo pradinių parametrų (t_0, x_0, h_0, φ_0), iki jam ištekant iš kaloriferio arba įtekant į džiovyklą, vaizduojamas vertikalia linija AB (nes $x_0 = x_1$) (25.5 pav.). Džiovinimo kameroje visi oro parametrai keičiasi ir iš jos ištekantis oras įgauna tokias vertes: t_2, x_2, h_2, φ_2. Entalpijos ir drėgnio kitimas aprašomas lygtimi

$$(h2 - h1)/(x2 - x0) = (h2 - h1)/(x2 - x1) = \Delta. \qquad (25.26)$$

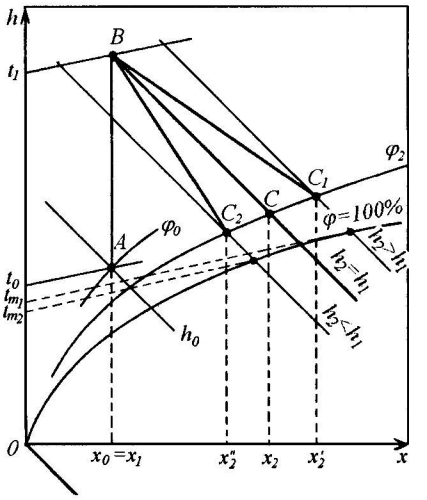
Akivaizdu, kad ši lygtis, kur dydis Δ dažnai vadinamas *džiovinimo kameros vidiniu šilumos balansu*, parodo džiovinimo linijos pasvirimo kampą. Pri-

klausomai nuo Δ dydžio reali džiovinimo proceso linija gali turėti vieną iš trijų padėčių: BC, kai $\Delta = 0$, BC_1, kai $\Delta > 0$, ir BC_2, kai $\Delta < 0$.

Kai $h_1 = h_2$, džiovinti galima tik dviem atvejais:

1) esant teoriniam džiovinimo variantui, t. y. kai šiluma naudojama tik drėgmei išgarinti;

2) vykstant realiam džiovinimo procesui, kai šiluma, sunaudota medžiagai ir transporto priemonėms pašildyti, bei šilumos nuostoliai yra kompensuojami papildomai tiekiant tokį pat šilumos kiekį į džiovyklą.



25.5 pav. Aplinkos oro parametrų kitimas džiovinimo proceso metu, kai $\varphi_2 = const$

Realioje džiovykloje (dėl šilumos nuostolių į aplinką ir kt.) oro entalpija mažėja ($h_2 < h_1$), todėl džiovinimo procesą vaizduoja linija BC_2. Norint diagramoje rasti tašką C_2, t. y. realaus džiovinimo proceso galinį tašką, reikia žinoti oro entalpiją h_2 proceso pabaigoje.

Apskaičiavus šilumos nuostolius į aplinką ir sąnaudas medžiagai ir transportavimo priemonėms įšildyti, randama oro entalpijos h_1 sumažėjimo vertė Δ ir entalpija h_2, t. y. $h_2 = h_1 - \Delta$. Pagal h_2 ir pasirinktus galinius džiovinimo proceso parametrus (t_2 arba φ_2) randamas taškas C_2.

Jeigu į džiovyklą papildomai tiekiama šiluma viršys šilumos nuostolius ($h_2 > h_1$), tai taškas C_1 bus aukščiau už tašką C ir realaus džiovinimo proceso tiesė BC_1 eis virš teorinio proceso linijos BC (kai $h_1 = const$). Toks džiovinimo būdas yra efektyvesnis, nes didesnė džiovinimo proceso varos jėga: $(x_2' - x_1) > (x_2'' - x_1)$, taip pat mažesnės medžiagai džiovinti reikalingo oro sąnaudos. Džiovinamosios medžiagos paviršiaus temperatūra t_m, nustatoma

pagal izoentalpijos ($t_d = const$) ir $\varphi = 100\ \%$ kreivių susikirtimo taško temperatūrą, padidėja nedaug, t. y. t_{m1} yra tik šiek tiek didesnė už t_{m2} (25.5 pav.).

25.6. Džiovinimo proceso medžiagų ir šilumos balansai

Medžiagų balansas sudaromas, kad būtų galima apskaičiuoti išgarinamos drėgmės kiekį ir džioviklio (šilto sauso oro) sąnaudas. Džiovinamosios medžiagos ir dujų srautų balansas sudaromas atskirai.

Visos džiovinamosios medžiagos balanso lygtis yra tokia:

$$G_1 = G_2 + W; \tag{25.27}$$

čia G_1 – į džiovyklą tiekiamas drėgnos medžiagos, kurios pradinis santykinis drėgnis w_1 (masės dalimis), kiekis, kg/s; G_2 – išdžiovintos medžiagos, kurios galinis santykinis drėgnis w_2 (masės dalimis), kiekis, kg/s; W – išgarinamos drėgmės kiekis, kg/s.

Balansą galima sudaryti ir absoliučiai sausai medžiagai, kurios kiekis džiovinimo metu nekinta:

$$G = G_1 \cdot (1 - w_1) = G_2 \cdot (1 - w_2). \tag{25.28}$$

Iš šios lygties apskaičiuojamas išdžiovintos medžiagos kiekis G_2 ir jos santykinis drėgnis w_2.

Skaičiuojant džiovyklą, iš drėgmės balanso reikia nustatyti džiovinimui sunaudoto oro kiekį. Sakysime, džiovinimui sunaudojama L kilogramų absoliučiai sauso oro. Į džiovyklą patenkančio oro drėgnis yra x_0, o iš džiovyklos ištekančio oro drėgnis – x_2. Tuomet su oru į džiovyklą pateks $L \cdot x_0$ kilogramų drėgmės, o su iš džiovyklos šalinamu oru pasišalins $L \cdot x_2$ kilogramų drėgmės. Iš medžiagos per tą trukmę bus išgarinta W kilogramų drėgmės. Tuomet džiovyklos drėgmės balansas atrodys taip:

$$L \cdot x_2 = L \cdot x_0 + W.$$

Iš čia sunaudoto oro kiekis L, kg:

$$L = \frac{W}{x_2 - x_0}. \tag{25.29}$$

Savitosios oro sąnaudos l yra aplinkos oro kiekis kilogramais, reikalingas vienam kilogramui drėgmės išgarinti. Jos apskaičiuojamos pagal lygtį

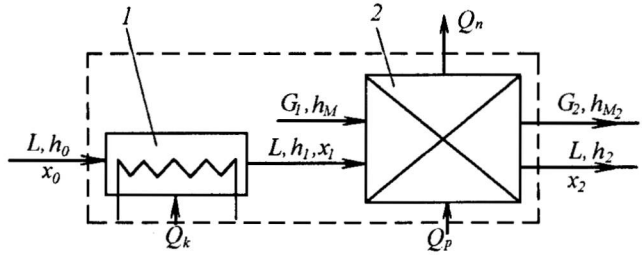
$$l = \frac{L}{W} = \frac{1}{x_2 - x_0}; \tag{25.30}$$

čia x_0 ir x_2 – aplinkos ir iš džiovyklos ištekančio oro drėgnis, $kg/kg_{sauso\ oro}$.

Pagal savitąsias oro sąnaudas galima lyginti džiovinimo skirtingos konstrukcijos ir dydžio džiovyklose efektyvumą.

Matome, kad savitosios oro sąnaudos priklauso nuo į džiovyklą tiekiamo ir iš jos ištekančio oro drėgnių skirtumo. Jos bus tuo didesnės, kuo didesnis pradinis oro drėgnis x_0, kuris priklauso nuo temperatūros ir santykinio drėgnio. Didėjant t_0 ir φ_0, o kitoms sąlygoms esant pastovioms, oro sąnaudos taip pat didės. Vadinasi, džiovinimui reikalingo oro sąnaudos vasarą bus didesnės negu žiemą, todėl, parenkant dujų tiekimo įrenginius (ventiliatorius ir pan.), reikia žinoti oro sąnaudas šilčiausiu metų laiku. Kita vertus, iš džiovyklos šalinamo oro drėgnis x_2 turi būti kuo didesnis.

Šilumos balansas. Bendriausiu atveju į džiovyklą tiekiamą šilumos kiekį Q sudaro džioviklio (dažniausiai oro) šiluma Q_k (jis įšildomas kaloriferyje) ir papildomai į darbo kamerą tiekiama šiluma Q_p (25.11 pav.).



25.6 pav. Konvekcinės džiovyklos schema:
1 – oro šildytuvas (kaloriferis); *2* – džiovinimo kamera

Sudarant šilumos balansą vartojami šie žymėjimai: c, c_d, c_m ir c_t – džioviklio (sauso oro), iš medžiagos išgarintos drėgmės, išdžiovintos medžiagos ir džiovykloje esančių transporto priemonių bei taros vidutinės savitosios šiluminės talpos, J/(kg·K); h_g^0 ir h_g'' – į džiovyklą tiekiamame ir iš džiovyklos ištekančiame džioviklyje esančių vandens garų entalpijos, J/(kg $_{\text{sauso oro}}$); t_0 ir t_2 – į džiovyklą tiekiamo ir iš džiovyklos ištekančio džioviklio temperatūra, °C; ϑ_1 ir ϑ_2 – į džiovyklą tiekiamos ir joje išdžiovintos medžiagos temperatūros, °C; G_t – transporto priemonių masė, kg; t_t' ir t_t'' – į džiovyklą tiekiamų ir iš džiovyklos šalinamų transporto priemonių temperatūros, °C; Q_k – kaloriferyje suteikta šiluma; Q_p – papildomai suteikta arba grąžinama šiluma.

Šilumos balanse reikia įvertinti visą į džiovyklą patenkančią ir joje sunaudojamą šilumą.

Tiekiama šiluma:

- su džiovikliu $L \cdot c \cdot t_0$;
- su džiovinamąja medžiaga $c_m \cdot G_2 \cdot \vartheta_1$;
- su iš medžiagos išgarinama drėgme $W \cdot c_d \cdot \vartheta_1$;
- su transporto priemonėmis patenkanti šiluma $G_t \cdot c_t \cdot t_t'$;
- kaloriferyje suteikta šiluma (Q_k) $L \cdot c \cdot (t_1 - t_0)$;
- papildomai džiovinimo kameroje suteikta arba į ją su recirkuliuojamu džiovikliu grąžinama šiluma Q_p.

Ištekanti šiluma:

- su pašalinamu džiovikliu $L \cdot c \cdot t_2$;
- su išdžiovinta medžiaga $c_m \cdot G_2 \cdot \vartheta_2$;
- su išgarinta drėgme $W \cdot h_g''$;
- įšildytų transporto priemonių išnešta šiluma $c_t \cdot G_t \cdot t_{t2}$;
- šilumos nuostoliai į aplinką Q_n.

Užrašome šilumos balanso lygtį:

$$\begin{aligned} &L \cdot c \cdot t_0 + G_2 \cdot c_m \cdot \vartheta_1 + W \cdot c_d \cdot \vartheta_1 + G_t \cdot c_t \cdot t_t' + Q = \\ &L \cdot c \cdot t_2 + G_2 \cdot c_m \cdot \vartheta_2 + W \cdot h_g'' + G_t \cdot c_t \cdot t_t'' + Q_n; \end{aligned} \qquad (25.31)$$

čia $Q = Q_k + Q_p$.

Išsprendę (25.31) lygtį, gauname:

$$Q = L \cdot c \cdot (t_2 - t_0) + W \cdot (h_g'' - c_d \cdot \vartheta_1) + G_2 \cdot c_m \cdot (\vartheta_2 - \vartheta_1) + G_t \cdot c_t \cdot (t_t'' - t_t') + Q_n. \qquad (25.32)$$

Iš (25.32) lygties matome, kad į džiovyklą tiekiama šiluma sunaudojama taip:

1) džiovikliui pašildyti: $L \cdot c \cdot (t_2 - t_0) = Q_a$;
2) drėgmei iš medžiagos išgarinti: $W \cdot (h_g'' - c_d \cdot \vartheta_1) = Q_g$;
3) išdžiovintai medžiagai pašildyti: $G_2 \cdot c_m \cdot (\vartheta_2 - \vartheta_1) = Q_m$;
4) transporto priemonėms pašildyti: $G_t \cdot c_t \cdot (t_t'' - t_t') = Q_t$;
5) nuostoliams į aplinką kompensuoti – Q_n.

Todėl (25.32) lygybę galima užrašyti ir taip:

$$Q = Q_a + Q_g + Q_m + Q_t + Q_n. \qquad (25.33)$$

Norint palyginti įvairių džiovyklų darbą, reikia nustatyti šilumos sąnaudas vienam kilogramui išgarinamos drėgmės. Padaliję abi (25.32) lygybės puses iš išgarintos drėgmės kiekio W, gausime vadinamąsias *savitąsias šilumos sąnaudas q*:

$$\frac{Q}{W} = q = l \cdot c \cdot (t_2 - t_0) + (h''_g - c_d \cdot \vartheta_l) + q_m + q_t + q_n = \\ = q_a + q_g + q_m + q_t + q_n. \tag{25.34}$$

Šią lygtį pertvarkę, gauname:

$$q_a + q_g = l \cdot c \cdot (t_2 - t_0) + (h''_g - c_d \cdot \vartheta_l),$$

arba

$$q_a + q_g = l \cdot [c_{s.o} \cdot (t_2 - t_0) + c_g \cdot x_0 \cdot (t_2 - t_0) + h''_g \cdot (x_2 - x_0)] - c_d \cdot \vartheta_l.$$

Dešinėje lygties pusėje pridėję ir atėmę dydį r_0 bei atlikę pakeitimus, gauname:

$$q_a + q_g = l \cdot \{c_{s.o} \cdot (t_2 - t_0) + x_0 \cdot [(r_0 + c_g \cdot t_2) - (r_0 + c_g \cdot t_0)] + h''_g \cdot (x_2 - x_0)\} - c_d \cdot \vartheta_l = \\ = l \cdot [c_{s.0} \cdot (t_2 - t_0) + x_0 \cdot (h''_g - h^0_g) + h''_g \cdot (x_2 - x_0)] - c_d \cdot \vartheta_l = \\ = l \cdot [(c_{s.o} \cdot t_2 + h''_g \cdot x_2) - (c_{s.0} \cdot t_0 + h^0_g \cdot x_0)] - c_d \cdot \vartheta_l = l \cdot (h_2 - h_0) - c_d \cdot \vartheta_l.$$

Įrašę gautąsias q_a ir q_g vertes į (25.34) lygybę, gauname:

$$q_k = l \cdot (h_2 - h_0) + q_m + q_t + q_n - q_p - c_d \cdot \vartheta_l; \tag{25.35}$$

čia q_k – savitosios šilumos sąnaudos kaloriferyje; q_p – savitoji papildoma šiluma; h_2 ir h_0 – iš džiovyklos ištekančio ir aplinkos oro entalpijos.

Sudaromas ir pro kaloriferį pratekėjusio džioviklio šilumos balansas. Šilumos kiekis $l \cdot h_l$, patenkantis į džiovyklą su pašildytu džiovikliu, yra lygus šviežio agento (aplinkos oro) šilumos $l \cdot h_0$ ir jam šildytuve suteiktos šilumos q_k sumai:

$$l \cdot h_0 + q_k = l \cdot h_l,$$

$$q_k = l \cdot (h_l - h_0). \tag{25.36}$$

Iš (25.35) ir (25.36) lygybių gauname:

$$l \cdot (h_l - h_0) = l \cdot (h_2 - h_0) + q_m + q_t + q_n - q_p - c_d \cdot \vartheta_l.$$

Iš čia

$$l \cdot (h_l - h_2) = q_m + q_t + q_n - (q_p + c_d \cdot \vartheta_l),$$

arba

$$l \cdot (h_2 - h_l) = (q_p + c_d \cdot \vartheta_l) - (q_m + q_t + q_n). \tag{25.37}$$

Pažymėsime reiškinį $(q_p + c_d \cdot \vartheta_1) - (q_m + q_t + q_n) = \Delta$.

Dydis Δ reiškia realios džiovyklos *papildomas savitąsias šilumos sąnaudas*, J/(kg $_{\text{išgarinamos drėgmės}}$). Įrašę į (25.37) lygtį Δ vertę, gauname:

$$l \cdot (h_2 - h_1) = \Delta.$$

$$h_2 = h_1 + \frac{\Delta}{l}. \qquad (25.38)$$

(25.38) lygtis ir yra *pagrindinė konvekcinių džiovyklų šilumos balanso lygtis.*

Kontaktinėms džiovykloms taikome šilumos balanso (25.31) lygtį, tik joje narys $L \cdot c \cdot (t_2 - t_0) = 0$, nes šiose džiovyklose oras nėra šildalas.

Užrašytose šilumos balanso lygtyse dydis Δ gali būti teigiamas (+), neigiamas (–) arba lygus nuliui. Kai $\Delta > 0$, džiovinimo procese džioviklio entalpija didėja, todėl $h_2 > h_1$, nes papildomai suteikiama šiluma kompensuoja visus šilumos nuostolius, t. y.

$$(q_p + c_d \cdot \vartheta_1) - (q_m + q_t + q_n) > 0.$$

Kai $\Delta < 0$, džioviklio entalpija džiovykloje mažėja ir $h_2 < h_1$. Tada

$$(q_p + c_d \cdot \vartheta_1) - (q_m + q_t + q_n) < 0$$

ir (25.38) lygtį užrašome taip:

$$h_2 = h_1 - \frac{\Delta}{l}. \qquad (25.39)$$

Kai $\Delta = 0$, džiovinimo procesas vyksta adiabatiškai, esant pastoviai oro entalpijai ($h = const$). Tuomet šilumos kiekis, kurį džioviklis aušdamas atiduoda drėgmei išgarinti, yra lygus šilumos kiekiui, kurį džiovikliui suteikia iš medžiagos išgarintoji drėgmė. Tokia džiovykla vadinama *teorine.*

Kartais tokios džiovinimo sąlygos gali būti sudaromos ir realioje džiovykloje. Tam reikia, kad į džiovinimo kamerą papildomai tiekiamos q_p ir su išgarinama drėgme įneštos $c_d \cdot \vartheta_1$ šilumos suma būtų lygi medžiagai q_m ir transporto priemonėms q_t pašildyti reikalingos šilumos ir šilumos nuostolių į aplinką q_n sumai, t. y.

$$q_p + c_d \cdot \vartheta_1 = q_m + q_t + q_n \qquad (25.40)$$

arba $\Delta = 0$. Tuomet (25.38) lygtis būtų užrašoma taip:

$$h_1 = h_2. \qquad (25.41)$$

25.7. Džiovinimo kinetika

Kaip buvo minėta anksčiau, džiovinimo kinetika nusakoma džiovinamosios medžiagos drėgmės ir jos temperatūros kitimo greičiu. Džiovinimo greitis priklauso ne tik nuo medžiagos struktūros, jos fizikinių savybių, paviršiaus formos ir struktūros, bet ir nuo džioviklio temperatūros, santykinio drėgnio, judėjimo greičio ir t. t. Drėgmės mainų procesus džiūstančioje medžiagoje sąlygoja išorinės ir vidinės difuzijos procesai.

Išorinė difuzija yra drėgmės garų difuzija nuo medžiagos paviršiaus į aplinką. Šis procesas priklauso nuo aplinkos gebėjimo sugerti vandens garus, t. y. nuo medžiagos paviršiuje (p_m) ir aplinkoje esančių vandens garų dalinių slėgių (p_g) skirtumo, džioviklio judėjimo greičio ir kt.

Vykstant *vidinės difuzijos* procesui, drėgmė juda iš vidinių medžiagos sluoksnių pro kapiliarus į paviršių. Vidinės difuzijos procesas priklauso nuo džiovinamosios medžiagos savybių, taip pat nuo išorinės difuzijos proceso ir šilumos mainų, o šio proceso intensyvumas – nuo džiovinamosios medžiagos laidumo drėgmei.

Vykstant drėgmės mainams, drėgmė, t. y. skystis arba garai, juda medžiagos poromis. Drėgmė medžiagoje judės tik tada, kai joje bus drėgmės gradientas $\frac{\Delta w}{\Delta s}$ ir temperatūros gradientas $\frac{\Delta t}{\Delta s}$; čia Δw – dviejų taškų drėgmės skirtumas, kai atstumas tarp jų lygus Δs. Analogiškai Δt – temperatūros skirtumas. Drėgmės gradientas medžiagoje atsiranda dėl išorinės difuzijos; drėgmė mažėja nuo centro garavimo paviršiaus link. Jeigu drėgmės judėjimas priklauso nuo drėgmės gradiento, sakoma, kad medžiagoje vyksta laidumo drėgmei procesas. Temperatūros gradientas medžiagoje atsiranda dėl šilumos mainų. Iš išorės šildomos medžiagos paviršiaus temperatūra bus aukštesnė už vidinių sluoksnių temperatūrą. Dėl temperatūros gradiento medžiagos kapiliaruose susidaro slėgių skirtumas, todėl drėgmė joje juda žemesnės temperatūros (vidinių sluoksnių) kryptimi. Jeigu drėgmės judėjimas priklauso nuo temperatūros gradiento, sakoma, kad medžiagoje vyksta *termolaidumo* drėgmei procesas.

Šildant medžiagą iš išorės, kaip dažniausiai ir būna, termolaidumo procesas trukdo drėgmei judėti paviršiaus link, taigi jo ženklas yra priešingas laidumo drėgmei ženklui.

Drėgmės judėjimo procesas medžiagoje aprašomas šia lygtimi:

$$m = -k \cdot \rho \cdot \left(\frac{\Delta w}{\Delta s} \pm \delta \cdot \frac{\Delta t}{\Delta s} \right); \qquad (25.42)$$

čia m – medžiagoje judančios drėgmės kiekis, kg/(m^2·s); k – laidumo drėgmei koeficientas, m^2/s; ρ – visiškai sausos medžiagos tankis, kg/m^3; δ – termolaidumo drėgmei koeficientas, kg $_{\text{drėgmės}}$/(kg $_{\text{sausos medžiagos}}$·K).

Kylant džiovinamos medžiagos temperatūrai, k didėja, δ – mažėja. Drėgmės judėjimas medžiagoje labiausiai priklauso nuo laidumo drėgmei proceso; šio proceso įtaka džiovinimui yra keletą kartų didesnė už termolaidumo drėgmei proceso įtaką.

Šildant dirbinius iš vidaus (pvz., džiovinant šamotinius tiglius, kai šildymo elementai dedami į vidų), laidumo ir termolaidumo procesai drėgmei sumuojasi. Šiuo atveju džiovinama daug intensyviau, negu tada, kai medžiaga šildoma iš išorės.

Džiovinimo greitis U yra drėgmės kiekis, išgarinamas nuo medžiagos paviršiaus ploto vieneto per laiko vienetą:

$$U = \frac{W}{F \cdot \tau}; \qquad (25.43)$$

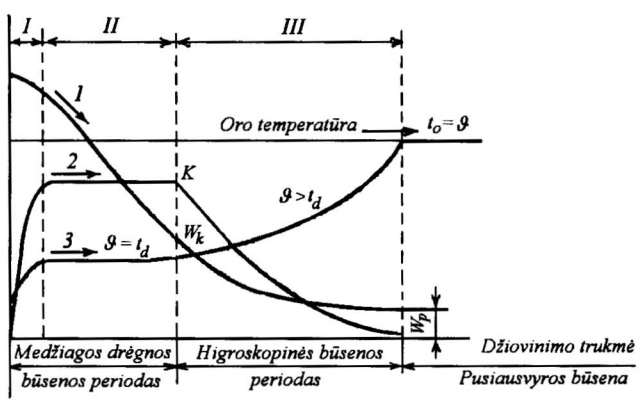
čia U – džiovinimo greitis, kg/(m^2·s); W – drėgmės kiekis, kg, išgarinamas nuo medžiagos paviršiaus ploto F, m^2, per trukmę τ, s.

Džiovinimo greitį, atsižvelgiant į masės mainus, galima aprašyti šia lygtimi:

$$U = \frac{W}{F \cdot \tau} = K \cdot \Delta_v; \qquad (25.44)$$

čia K – drėgmės perdavimo koeficientas; Δ_v – proceso varos jėga.

Džiovinimo proceso varos jėga išreiškiama medžiagos paviršiuje esančių vandens garų (p_m) ir ore esančių vandens garų (p_g) dalinių slėgių skirtumu: $p_m - p_g$. Pagal tai džiūvimo procesą sutartinai galima suskirstyti į tris periodus: pašildymą, džiūvimą pastoviu greičiu ir džiūvimą mažėjančiu greičiu (25.7 pav.).



25.7 pav. Džiovinimo proceso grafikas: *I* – pašildymo periodas, *II* – džiūvimo pastoviu greičiu periodas, *III* – džiūvimo mažėjančiu greičiu periodas; *1* – medžiagos santykinis drėgnis W, %, *2* – džiūvimo greitis U, kg/(m^2·s), *3* – medžiagos temperatūra ϑ, °C

Pašildymo *periodu* džiovinamos medžiagos temperatūra ir drėgmės garavimo greitis didėja tol, kol nusistovi pusiausvyra tarp šilumos kiekio, kurį gauna medžiagos paviršius, ir šilumos sąnaudų drėgmei išgarinti. Šiuo periodu šildomos medžiagos temperatūra t_m pakyla iki drėgno termometro temperatūros t_d, drėgmė tik truputį sumažėja.

Pastovaus džiūvimo greičio periodui būdingas nuostovusis šilumos mainų ir drėgmės mainų procesas. Drėgmės kiekis, kuris išgarinamas nuo drėgmės prisotinto medžiagos paviršiaus, maždaug atitinka tą drėgmės kiekį, kuris išgarinamas nuo laisvojo (atviro) vandens paviršiaus. Džiovinimo greitis priklauso nuo išorinės difuzijos. Šiuo *periodu džiūvimo greitis yra didžiausias*, o medžiagos temperatūra $t_m = const$.

Džiūvimo mažėjančiu greičiu periodo pradžią atitinka taškas K, vadinamas kritiniu tašku, o medžiagos drėgmę šiame taške – kritinė drėgmė W_k (25.7 pav.).

Džiūvimui mažėjančiu greičiu daugiausia įtakos turi vidinė difuzija, t. y. drėgmės judėjimo į medžiagos paviršių procesai. Medžiagai džiūstant, mažėja jos laidumas drėgmei, o kylant jos paviršiaus temperatūrai, – didėja medžiagos termolaidumo drėgmei koeficientas, dėl to mažėja ir džiūvimo greitis. Šio periodo pabaigoje susidaro pusiausvirasis drėgnis, ir džiūvimo greitis tampa lygus nuliui, o medžiagos temperatūra pasiekia džioviklio temperatūrą t_a. Vadinasi, džiūvimo greitis priklauso nuo daugybės veiksnių ir gali būti išreiškiamas lygtimi

$$U = f\left(w_1; w_2; \vartheta; t; p_m; p_g; k; \delta; F; s; Re\right). \qquad (25.45)$$

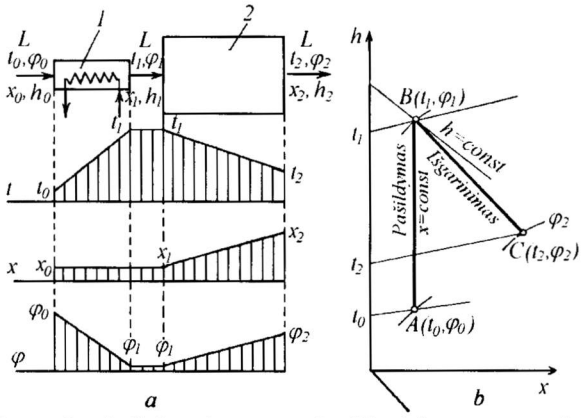
Be to, daugelio medžiagų (gaminių) džiūvimo greitis ribojamas dėl traukimosi įtempių ir deformacijų. Optimalus džiūvimo greitis nustatomas atlikus laboratorinius ir gamybinius tyrimus. Žinant džiovinimo greitį, galutinai nustatomas džiovinimo režimas, džiovyklų matmenys ir kiti parametrai.

25.8. Džiovinimo schemos

Dažniausiai naudojamos tokios džiovinimo schemos: pagrindinis, arba paprastasis, džiovinimas oru; džiovinimas papildomai pašildant orą; džiovinimas esant tarpiniam (laiptuotam) oro pašildymui; džiovinimas esant dalinei oro recirkuliacijai; džiovinimas dūmais.

Pagrindinio, arbapaprastojo, džiovinimo procese (25.8 pav.) aplinkos oras, kurio parametrai t_0, φ_0, X_0 ir h_0, šildytuve (kaloriferyje) *1* pašildomas iki temperatūros t_1.

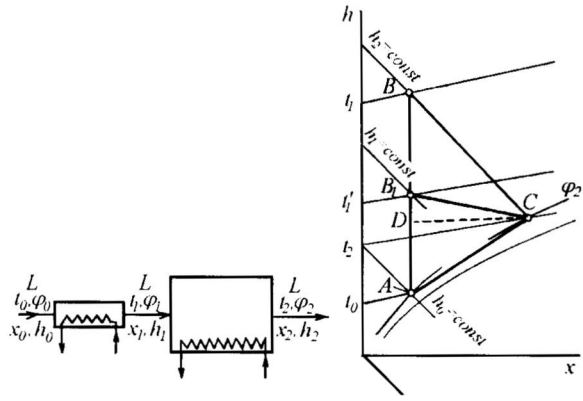
Šią temperatūrą atitinkančius kitus oro parametrus pažymėsime raidėmis φ_1, x_1, h_1. Po to šiltas oras tiekiamas į darbinę džiovinimo kamerą *2*, o iš jos išteka jau tokių parametrų: t_2, φ_2, h_2.



25.8 pav. Pagrindinio, arba paprastojo, džiovinimo proceso schema: *a* – pagrindinių oro parametrų *t*, *x* ir φ kitimas džiovinimo procese; *b* – realaus džiovinimo proceso vaizdavimas *h*–*x* diagramoje

Džiovinimo procesas *h*–*x* diagramoje vaizduojamas laužtine linija *ABC*. Oro šildymą kaloriferyje (nuo t_0 iki t_1, kai $X_0 = X_1$, atitinka atkarpa *AB*, o drėgmės išgarinimą darbinėje džiovyklos ertmėje – linija *BC*. Tai dažniausiai taikomas džiovinimo variantas, nors tokiam džiovinimo procesui būdingas gana didelis temperatūrų ($t_1 - t_2$) skirtumas džiovykloje, t. y. griežtas režimas.

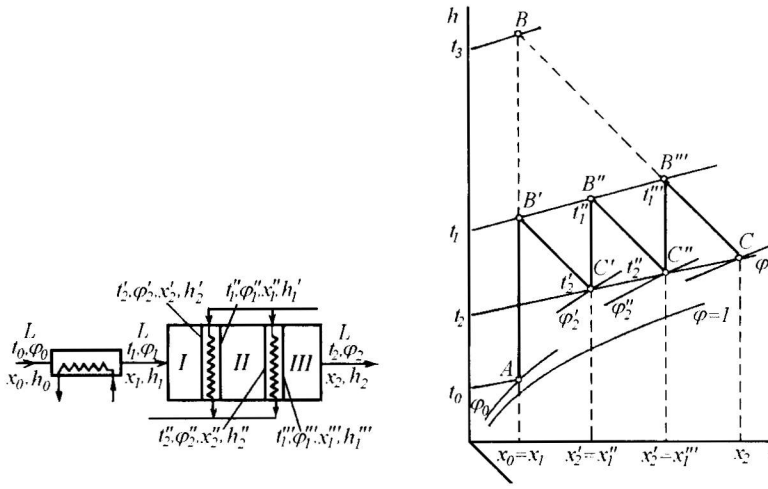
Džiovinant papildomo oro pašildymo džiovyklose (25.9 pav.), oras iš pradžių pašildomas kaloriferyje (taškas B_1), o paskui papildomai pašildomas džiovykloje (taškas *B*). Procesą vaizduoja linijos *ABC*. Temperatūrų skirtumas ($t_1 - t_2$) čia yra mažesnis ir džiovinimo režimas švelnesnis, negu taikant pagrindinį variantą.



25.9 pav. Džiovinimo papildomai pašildant orą schema ir proceso vaizdavimas *h*–*x* diagramoje

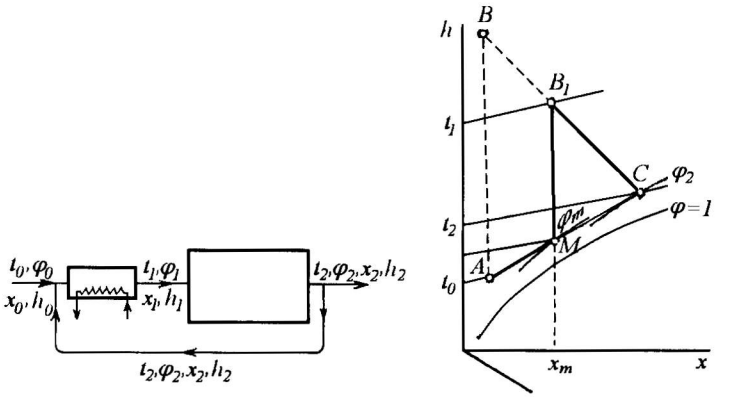
Džiovyklų, kuriose oras pašildomas tarpiniu būdu (laiptuotai), darbo kameroje yra keletas papildomų šildytuvų, kurie dalija ją į zonas (25.10 pav.).

h–x diagramoje visą džiovinimo procesą vaizduoja laužtinė linija $AB'C'B''C'B'''C$. Išgarinimo procesą antrojoje zonoje vaizduoja linija $B'''C'''$ ir pan. Džiovykloje oras pašildomas tarpiniu būdu (linijos AB', $C'B''$, $C'B'''$), todėl atskirose zonose susidaro švelnus džiovinimo režimas. Tokioje džiovykloje džiovinimo režimą galima reguliuoti gana plačiai.



25.10 pav. Džiovinimo esant tarpiniam (laiptuotam) oro pašildymui schema ir proceso vaizdavimas *h–x* diagramoje

Dalinės recirkuliacijos džiovyklose dalis panaudoto oro sumaišoma su šviežiu oru ir gautuoju mišiniu džiovinama (25.11 pav.). Procesą vaizduoja laužtinė linija AMB_1C. Joje taškas A rodo šviežio oro, C – panaudoto oro ir taškas M – į džiovyklą tiekiamo mišinio būseną. Tiesė AC vaizduoja šviežio ir panaudoto oro sumaišymą taške M, linija MB_1 – mišinio pašildymą kaloriferyje ir linija B_1C – džiovinimą (drėgmės išgarinimo ir medžiagos džiovinimo procesą). Šiuo atveju džiovinimo režimas yra gana švelnus; be to, palyginti su pagrindiniu variantu, čia ekonomiškiau naudojama šiluma.



25.11 pav. Džiovinimo esant dalinei oro recirkuliacijai schema ir proceso vaizdavimas h–x diagramoje

Dūmais paprastai džiovinama pagal pagrindinę schemą, rečiau – pagal recirkuliacinę. Džiovinama kūryklose gautais degimo produktais – dūmais, atskiestais oru iki reikalingos mišinio temperatūros. Dažnai džiovinama krosnių, katilinių ir pan. išmetamaisiais dūmais. Dūmų savybės panašios į oro savybes, tik jie drėgnesni. Kadangi dūmų temperatūra aukštesnė negu oro, tai jie gali kelis kartus daugiau sugerti drėgmės. Kuro sąnaudos, džiovinant dūmais, būna apie 10...25 % mažesnės negu džiovinant oru. Tačiau dūmais džiovinama medžiaga užteršiama. Be to, reikia periodiškai valyti recirkuliacinius kanalus, kad jie neužsikimštų.

Į džiovyklą tiekiamų dūmų drėgnis priklauso nuo suminio vandens garų kiekio. Dūmuose garų susidaro degant kurui; be to, jų yra atmosferos ore, kuriuo degimo produktai atskiedžiami iki reikalingos temperatūros.

Dūmų drėgnis x_d, kuris susidaro visiškai sudeginus 1 kg kietojo arba skystojo kuro, apskaičiuojamas padalijus dūmuose esantį vandens garų kiekį G_g iš sausų dūmų kiekio $G_{s.d}$:

$$x_d = \frac{G_g}{G_{s.d}} = \frac{0{,}01 \cdot \left(9 \cdot H^d + W^d\right) + \alpha \cdot L_0 \cdot x_0}{1 + \alpha \cdot L_0 - 0{,}01 \cdot \left(A^d + 9 \cdot H^d + W^d\right)}; \qquad (25.46)$$

čia x_d – dūmų drėgnis, $kg_{drėgmės}/kg_{sausų\ dūmų}$; H^d; W^d; A^d – vandenilio, drėgmės ir pelenų procentinis kiekis kuro darbinėje masėje; L_0 – kurui sudeginti sunaudoto sauso oro kiekis, kg; α – oro pertekliaus koeficientas, rodantis, kiek oro sunaudota degimo produktams atskiesti ir kiek jo įsiurbta pro nesandarumus.

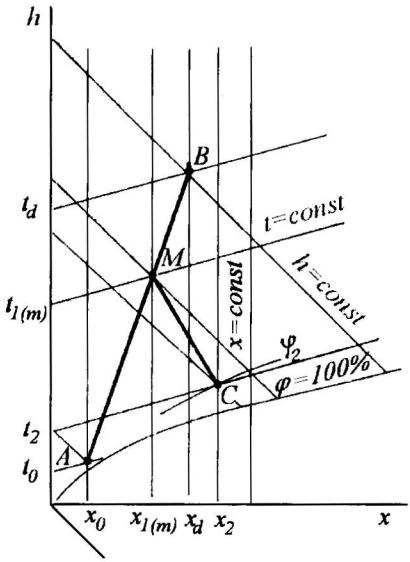
Ypač daug vandens garų susidaro deginant gamtines dujas, kurių pagrindinė sudedamoji dalis yra angliavandeniliai.

Dūmų (kuro degimo produktų ir oro mišinio), kurių sudėtis yra žinoma, drėgnis apskaičiuojamas pagal šią lygtį:

$$x_d = \frac{0{,}804 \cdot V_{H_2O}}{1{,}977 \cdot V_{CO_2} + 1{,}251 \cdot V_{N_2} + 1{,}429 \cdot V_{O_2}}; \qquad (25.47)$$

čia x_d – dūmų drėgnis, $kg_{drėgmės}/kg_{sausų\ dūmų}$; V_{CO2}, V_{N2}, V_{O2} – džiovinimui naudojamų dūmų sudėtis, išreikšta nm^3/nm^3 dujų arba nm^3/kg kietojo arba skystojo kuro; nm^3 – tūris, m^3, nustatytas normaliomis fizikinėmis oro sąlygomis ($t = 0$ °C, $p = 760$ mm Hg st.).

Kai degimo produktai yra labai atskiesti oru, džiovinimui naudojamų dūmų tankis bei jų entalpija atitinka analogiškus drėgno oro parametrus, esant toms pačioms sąlygoms. Kad būtų lengviau skaičiuoti, galima naudotis orui sudarytomis lentelėmis bei diagramomis. Pavyzdžiui, *h–x* diagramoje (25.12 pav.) taškas *A* atitinka aplinkos oro, o taškas *B* – iš kūryklos ištekančių degimo produktų parametrus. Į džiovyklą tiekiamų dūmų parametrus atitinka taškas *M*. Kadangi dūmai drėgnesni negu oras, tai linija *AB* yra pasvirusi į dešinę nuo vertikalės ($x_0 = const$).



25.12 pav. Džiovinimo dūmais proceso vaizdavimas *h–x* diagramoje

25.9. Džiovyklos

Įrenginiai, kuriuose džiovinamos medžiagos, vadinami džiovyklomis. Kadangi džiovinti reikia labai skirtingas medžiagas, todėl džiovyklų yra įvairių konstrukcijų.

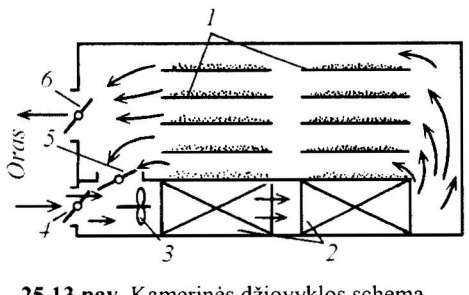
Pagal slėgį virš džiovinamosios medžiagos džiovyklos skirstomos į *atmosferines* ir *vakuumines*, o pagal darbo režimą – į *periodinio* ir *nuolatinio veikimo*. Kadangi šiluma džiovinamajai medžiagai gali būti perduodama įvairiai, tai džiovyklos būna *konvekcinės, kontaktinės, radiacinės, elektrinės* ir *mišriosios* (konvekcinės radiacinės, aukštadažnės radiacinės ir kt.). Atsižvelgiant į džioviklio ir medžiagos judėjimą, džiovyklos skirstomos į *pasrovines, priešsrovines, kryžmines, recirkuliacines* arba *nerecirkuliacines*. Jose medžiagos gali būti džiovinamos *karštu oru, dūmais, garais, elektra* ir kt.

Pagal technologinę paskirtį, skiriamos *gabalinių, birių, skystų, tirštų medžiagų, suformuotų pusgaminių* ir kt. džiovyklos.

Apibūdinant džiovyklas pagal konstrukciją, atsižvelgiama į darbo kameros formą ir medžiagos judėjimo joje pobūdį. Pagal tai skiriamos *kamerinės, tunelinės, būgninės, konvejerinės, vamzdinės, valcinės, pneumatinės, purkštuvinės, puraus sluoksnio* ir kitokios džiovyklos. Norint tiksliai apibūdinti džiovyklą, paprastai reikia nurodyti keletą minėtųjų požymių (pvz., kontaktinė nuolatinio veikimo valcinė vakuuminė džiovykla).

25.9.1. Konvekcinės džiovyklos

Kamerinės džiovyklos. Šio tipo džiovyklos yra periodinio veikimo. Pagrindinis šių džiovyklų pranašumas – konstrukcijos ir džiovinimo proceso paprastumas. Džiovinama vienoje ar keliose stačiakampėse kamerose. Priklausomai nuo džiovinimo temperatūros ir džiovinamosios medžiagos savybių kameros gali būti sumontuotos iš plytų, betono, metalo ir kitų medžiagų. Kamerų dydį lemia džiovinimo trukmė ir našumas. Džiovinamoji medžiaga, sukrauta ant lentynų *1* (25.13 pav.) arba vagonėlių, įstumiama pro tam tikras angas arba duris, kurios džiovinimo proceso metu yra sandariai uždaromos.



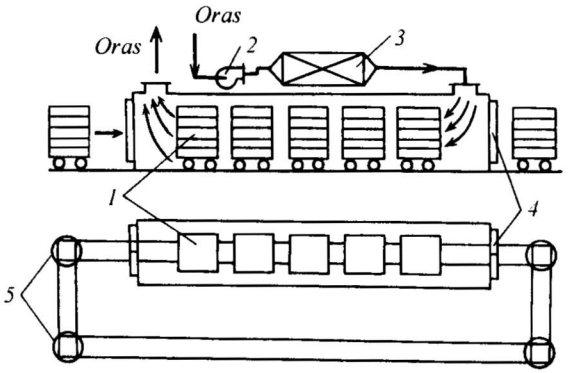
25.13 pav. Kamerinės džiovyklos schema

Pro angą *4* į džiovyklą patekęs oras ventiliatoriumi *3* prapučiamas pro šildytuvą *2* ir apteka džiovinamąją medžiagą. Dalis panaudoto oro recirkuliuoja: jis sumaišomas su naujai tiekiamu oru ir grąžinamas atgal į džiovyklą. Džiovinimo režimas reguliuojamas keičiant sklendžių *5* ir *6* posvyrio kampą.

Didžiausias kamerinių džiovyklų trūkumas yra gana didelės darbo jėgos ir energijos sąnaudos, sunku aptarnauti ir kontroliuoti procesą, medžiaga netolygiai džiūsta, džiovinimo ciklas ilgai trunka, nes medžiaga nejuda, pakraunant ir iškraunant kameras patiriama papildomų šilumos nuostolių. Dėl to savitosios šilumos sąnaudos periodinio veikimo kamerinėse džiovyklose yra didesnės negu nuolatinio veikimo džiovyklose, pvz., tunelinėse.

Tunelinės džiovyklos. Šios džiovyklos yra nuolatinio veikimo. Jose dažniausiai džiovinami stambūs suformuoti pusgaminiai, pvz., keraminiai. Darbo kamerą sudaro ilgas tunelis, kuriame džiovinamoji medžiaga juda sukrauta ant vagonėlio platformos arba ant begalinės juostos. Tuneliai jungiami į blokus (po 8...10). Bendras tunelio ilgis gali būti 30...40 m. Jame nutiesti bėgiai vagonėliams, kurie į džiovyklą įstumiami hidrauliniais arba mechaniniais stumtuvais. Tokių džiovyklų našumas yra didelis, darbo procesai čia automatizuoti. Didžiausias šių džiovyklų trūkumas yra tas, kad viršutinės gaminių eilės išdžiūsta geriau negu apatinės.

Priešsrovinės tunelinės džiovyklos schema pateikta 25.14 pav.



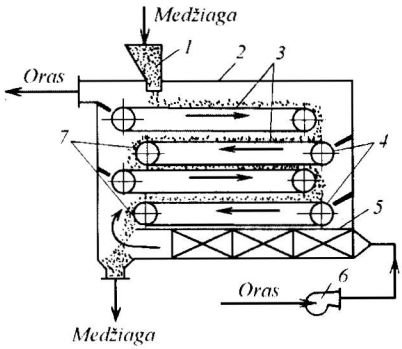
25.14 pav. Tunelinės džiovyklos schema: *1* – vagonėliai, *2* – ventiliatorius, *3* – kaloriferis–šilumokaitis, *4* – durys, *5* – vagonėlių perstatymo ir paskirstymo keliai

Tunelio viduje lėtai juda vagonėliai *1*, prikrauti džiovinamosios medžiagos. Vagonėlių judėjimo greitis priklauso nuo džiovinamosios medžiagos ir šilumnešio (oro, dūmų) savybių. Šilto oro srautas ventiliatoriumi *2* per kaloriferį *3* pučiamas priešpriešiais medžiagos judėjimo krypčiai ir, aptekėdamas džiovinamąją medžiagą, ją džiovina. Džioviklio judėjimo greitis būna

2...5 m/s. Tunelio galai sandariai uždaromi durimis *4*, kurios periodiškai atidaromos, ištraukiant vagonėlį su išdžiovinta medžiaga ir tuo pačiu metu įstumiant vagonėlį su drėgna medžiaga. Kad lengviau ir greičiau būtų galima iškrauti ir pakrauti džiovyklas, įrengiami vagonėlių paskirstymo keliai.

Efektyviai pusgaminiai džiovinami daugiazonėse tunelinėse džiovyklose, kuriose karštas oras, panaudotas vienoje zonoje, sumaišytas su šviežiu oru ir pašildytas kaloriferyje, tiekiamas į kitą zoną papildomai panaudoti. Tunelinėse džiovyklose dažnai panaudojamas karštas oras, ištekantis iš tunelinės krosnies aušinimo zonos.

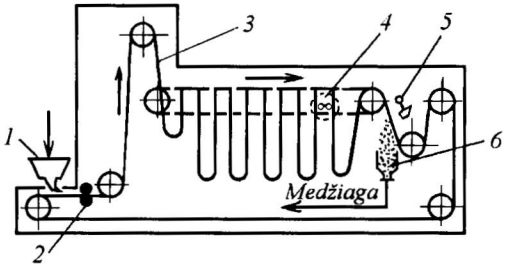
Juostinės džiovyklos. Šios džiovyklos yra nuolatinio veikimo. Jos skirtos džiovinti birioms, granuliuotoms arba stambiadispersėms medžiagoms, taip pat ir pusgaminiams. Medžiaga juda per darbo kamerą, sukrauta ant vienos arba ant kelių juostų. Be to, kameroje gali būti ir keliais aukštais įrengta begalinė juosta arba konvejerinė grandinė su prikabintais lopšeliais-lentynėlėmis, kuriuose yra džiovinamoji medžiaga. Daugiajuostę džiovyklą (25.15 pav.) sudaro stačiakampė kamera *2*, kurioje juda kelios begalinės juostos *3*. Jos pagamintos iš specialaus gumuoto audeklo, tinklo ir kt. Juostos judėjimo greitis – 0,005...0,01 m/s. Juostos kameroje įtempiamos varomaisiais *4* ir varančiaisiais *7* velenais. Ventiliatoriaus *6* pučiamas šviežias oras pirmiausia patenka į šildytuvą *5*, kuriame įkaista ir yra nukreipiamas į džiovyklą. Medžiaga beriama tiektuvu *1*. Oro greitis džiovykloje yra apie 3 m/s.



25.15 pav. Juostinės džiovyklos schema: *1* – tiektuvas, *2* – kamera, *3* – begalinė juosta, *4* – varomasis velenas, *5* – šilumokaitis, *6* – ventiliatorius, *7* – varantysis velenas

Kilpinės džiovyklos. Šios džiovyklos (25.16 pav.) yra nuolatinio veikimo, ir jose pastos tirštumo medžiagos džiovinamos ant tankaus tinklinio audinio.

Tiektuvu *1* medžiaga pilama ant begalinės juostos *3*. Garais šildomi volai *2* įspaudžia medžiagą į tinklo akutes ir ji patenka į džiovinimo kamerą, kurioje juosta juda kilpomis. Išdžiūvusią medžiagą nukrato plaktukas *5*. Iš džiovyklos ji toliau gali būti gabenama, pvz., sraigtiniu transporteriu.



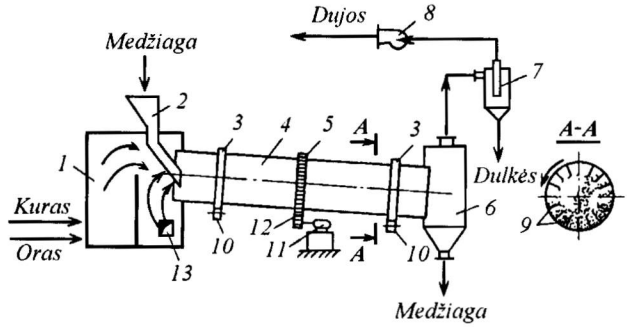
25.16 pav. Kilpinės džiovyklos schema: *1* – tiektuvas, *2* – šildomieji volai, *3* – begalinė juosta, *4* – ventiliatoriai, *5* – medžiagos nukratymo plaktukas, 6 – sraigtinio transporterio tiekimo bunkeris

Pašildytą orą pučia ventiliatoriai *4*, įrengti abiejose kameros pusėse. Džiovykloje gali būti ir tarpiniai oro šildytuvai.

Medžiagos sluoksnis būna nestoras ir iš abiejų pusių aptekamas šilto oro, todėl ji greitai džiūsta. Kilpinėse džiovyklose taip pat džiovinami tekstilės audiniai, popierius ir pan.

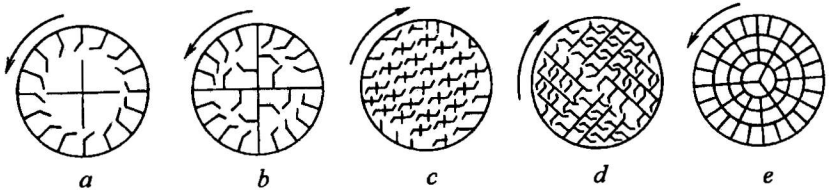
Būgninės džiovyklos. Šios džiovyklos (25.17 pav.) plačiai naudojamos birioms bei gabalinėms medžiagoms (smėliui, moliui, anglims ir kt.) nepertraukiamai džiovinti. Dažniausiai džiovinama esant atmosferos slėgiui.

Būgnas suvirinamas arba sukniedijamas iš 10...14 mm storio plieninių lakštų. Jo skersmuo būna nuo 1 iki 3,5 m, o ilgis – iki 30 m. Kad būtų mažesni šilumos nuostoliai, būgnas iš išorės padengiamas izoliacinių medžiagų sluoksniu, kuris iš išorės apdengiamas apsauginiu apvalkalu iš skardos lakštų.



25.17 pav. Būgninės džiovyklos schema: *1* – kūryklos kamera, *2* – latakas medžiagai tiekti, *3* – bandažas, *4* – džiovinimo būgnas, *5, 12* – būgno pavara, *6* – iškrovimo latakas, *7* – ciklonas, *8* – ventiliatorius, *9* – pertvaros medžiagai pakelti būgno viduje, *10* – atraminiai ritinėliai, *11* – variklis, *13* – dūmtraukis

Ant būgno būna pritvirtinti ne mažiau kaip du plieniniai bandažai, kuriais jis remiasi į atraminių ritinėlių poras. Būgnas pasviręs 4...6 laipsnių kampu iškrovimo kryptimi ir sukasi apie savo ašį 3...6 aps./min greičiu, todėl medžiaga iš lėto slenka iškrovimo angos link. Kad medžiaga būgne turėtų didesnį sąlyčio su džiovikliu paviršiaus plotą, jo viduje prie sienelių įrengiamos įvairios pertvaros (išilginės mentelės, lentynėlės ir kt.,) (25.18 pav.).

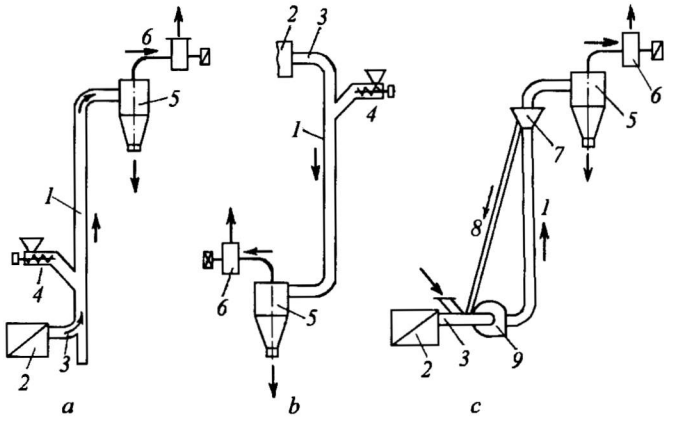


25.18 pav. Džiovinimo būgne įrengiamų pertvarų tipai:
a – pakeliančiųjų mentelių, *b* – sektorinių mentelių, *c* – atskirų nedidelių susisiekiančių sektorių, *d* ir *e* – perpylimo sektorių

Tokios lentynėlės pakelia drėgną medžiagą kartu su būgnu aukštyn ir ši, pasiekusi tam tikrą aukštį, vėl krinta žemyn. Taip padidinamas sąlyčio paviršiaus plotas ir vis nauji medžiagos paviršiai yra aptekami džioviklio. Išilginės mentelės (25.18 pav., *a*) įrengiamos džiovinant stambių gabaliukų pavidalo, prilimpančias medžiagas. Sektorinės perpylimo ir paskirstymo pertvaros (25.18 pav., *b...e*), sukantis būgnui, maišo džiovinamąją medžiagą, perpildamos ją nuo vienų mentelių arba lentynėlių ant kitų iš nedidelio aukščio, todėl yra skirtos gabalėlių pavidalo arba smulkiai dulkančiai medžiagai džiovinti. Kartais (pvz., džiovinant molį) būgne pakabinamos grandinės, kurios ne tik pagerina šilumos mainus, bet ir smulkina džiovinamosios medžiagos gabalus. Džioviklis ir medžiaga dažniausiai juda ta pačia kryptimi, todėl medžiaga neperkaista, nes aukščiausios temperatūros džioviklis pradžioje liečiasi su drėgniausia medžiaga.

Be konvekcinių būgninių džiovyklų, naudojamos ir *kontaktinės*, kuriose džiovinamoji medžiaga tiesiogiai nesiliečia su džiovikliu. Čia džioviklis tiekiamas būgne nutiestais vamzdžiais.

Pneumatinės džiovyklos. Šiose džiovyklose (25.19 pav.) džiovinamos birios smulkiagrūdės medžiagos: anglys, grūdai, smėlis ir kt. Medžiaga džiūsta pakibusi džiovinimo vamzdyje *1*, kurio ilgis būna 10...20 m, o skersmuo 0,5...1,2 m. Į jį tiekiamos 300...800 °C temperatūros karštos dujos. Dujų greitis vamzdyje – 10...30 m/s. Medžiaga gali būti džiovinama kylančiame (25.19 pav., *a, c*) arba besileidžiančiame (25.19 pav., *b*) dujų sraute.

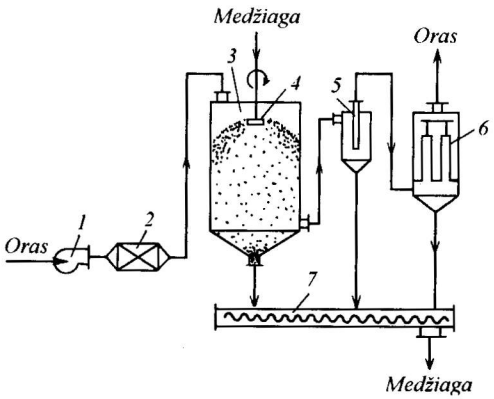


25.19 pav. Pneumatinės džiovyklos schema:
a – kylančio srauto, *b* – besileidžiančio srauto, *c* – džiovinimo ir smulkinimo

Karštos dujos arba kaloriferyje *2* įšildytas oras ventiliatoriumi *6* pro atvamzdį *3* tiekiamas į vamzdį *1* (25.19 pav., *a*). Medžiaga į tą patį vamzdį *1* tiekiama tiektuvu *4*. Išdžiovinta medžiaga nusodinama ciklone 5, o išvalytos dujos išpučiamos į atmosferą. 25.19 pav., *c*, pateikta schema džiovyklos, kurioje medžiaga iš pradžių susmulkinama ventiliatoriniame malūne *9*. Iš jo medžiaga ir dujos patenka į džiovinimo vamzdį *1*. Stambios dalelės separatoriuje *7* atskiriamos ir vamzdžiu *8* grąžinamos pakartotinai smulkinti. Kadangi čia džiovinama pasroviniu būdu, todėl medžiaga neperkaitinama, nors džioviklio temperatūra palyginti aukšta. Džiovinimo trukmė – keletas sekundžių, todėl šiose džiovyklose gali būti džiovinamos nelabai drėgnos ir gerai drėgmę atiduodančios medžiagos. Šio tipo džiovyklos yra efektyvios, kompaktiškos, tik jose sunku reguliuoti džiovinimo procesą ir sunaudojama daug energijos.

Purkštuvinės džiovyklos. Šiose džiovyklose (25.20 pav.) džiovinamos skystos suspensijos ar emulsijos (dažai, kraujas, pienas – gaminant pieno miltelius ir kt.) kietos medžiagos dalelėms gauti.

Skystis intensyviau džiūsta didėjant jo ir džioviklio sąlyčio paviršiui, t. y. džiūvimo intensyvumas priklauso nuo išpurškiamo skysčio dispergavimo laipsnio. Skystis išpurškiamas šiais būdais: *išcentriniu, mechaniniu ir pneumatiniu*. Norint išpurkšti išcentriniu būdu, džiovinamasis skystis tiekiamas ant greitai besisukančio disko. Diskų periferinis sukimosi greitis – 100...180 m/s. Jais galima išpurkšti suspensijas bei klampius skysčius. Purškiant mechaniniu būdu, skystis tiekiamas į purkštuvą 20,0 MPa slėgiu. Kadangi purkštuvo anga yra mažo skersmens (iki 0,5 mm), tai mechaniniai purkštuvai netinka suspensijoms ir klampioms medžiagoms išpurkšti. Purškiant pneumatiniu būdu, skystis į purkštuvus tiekiamas iki 0,15...0,5 MPa suslėgtu oru.

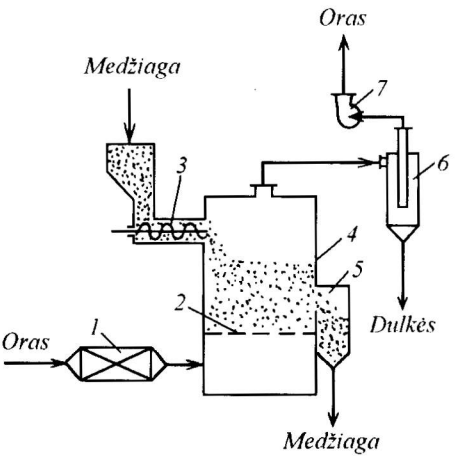


25.20 pav. Purkštuvinės džiovyklos schema: *1* – ventiliatorius, *2* – šilumokaitis-kaloriferis, *3* – džiovinimo kamera, *4* – sukamasis diskas, *5* – ciklonas, *6* – rankovinis filtras, *7* – sraigtinis transporteris

Purkštuvinės džiovyklos geros tuo, kad medžiaga greitai išdžiūsta. Džiovinamos medžiagos temperatūra būna artima skysčio garavimo temperatūrai, o džioviklio temperatūra yra aukšta. Kadangi džiovinama medžiaga su džiovinimo agentu kontaktuoja labai trumpą laiką, todėl šis būdas ypač tinka medžiagoms, kurios yra neatsparios aukštoje temperatūroje. Gautas produktas yra miltelių pavidalo, todėl toliau jo smulkinti nereikia. Šio tipo džiovyklų trūkumas yra nedidelis tūrinis intensyvumas, t. y. 2...25 $kg_{drėgmės}/(m^3 \cdot h)$, todėl jų kameros būna didelių matmenų. Be to, jos naudoja daug energijos, šilumos ir yra gana sudėtingos konstrukcijos.

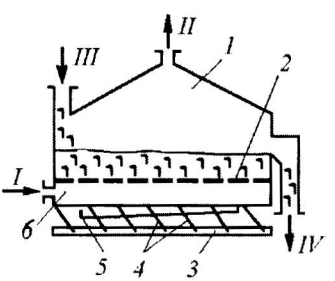
Puraus (pseudoverdančiojo) sluoksnio džiovyklos. Jos (25.21 pav.) gali būti periodinio ir nuolatinio veikimo. Ventiliatoriumi *7* oras per šilumokaitį-kaloriferį ir paskirstymo tinklelį *2* siurbiamas į džiovinimo kamerą *4*. Drėgna smulki medžiaga sraigtiniu transporteriu beriama į viršutinę kameros dalį. Ji kylančioje karšto oro srovėje sudaro purų (pseudoverdantįjį) sluoksnį. Išdžiūvusi medžiaga byra per iškrovimo įrenginį *5* ir transportuojama į sandėlį, o smulkios dalelės atskiriamos ciklone *6*.

Tokios džiovyklos yra labai našios. Tūrinis kameros apkrovimas siekia kelis šimtus kilogramų drėgmės iš vieno kubinio metro per valandą. Kadangi džiovinimas trunka vos kelias minutes, tai galima naudoti agentą, kurio temperatūra aukštesnė už tos medžiagos leistinąją kaitinimo temperatūrą. Džiovyklose gana efektyviai panaudojama džioviklio šiluma ir galima automatiškai reguliuoti procesą. Tačiau tokiose džiovyklose negalima išdžiovinti medžiagų, kurių yra didesnė pradinė drėgmė ir stambesni gabalai. Procesas intensyviau vyksta daugiapakopėse (kelių pakopų) arba daugiasekcėse puraus sluoksnio džiovyklose. Jose medžiaga nuosekliai pereina visas aparato sekcijas, o jai priešpriešiais juda džioviklis.



25.21 pav. Puraus sluoksnio džiovyklos schema: *1* – šilumokaitis-kaloriferis, *2* – paskirstymo tinklelis, *3* – sraigtinis transporteris, *4* – džiovinimo kamera, *5* – iškrovimo įrenginys, *6* – ciklonas, *7* – ventiliatorius

Pailgų grūdelių, adatėlių bei plokštelių formos birios medžiagos dujų sraute sunkiai sudaro pseudoverdantįjį sluoksnį. Šios medžiagos džiovinamos **vibracinėse aeracinėse džiovyklose** (25.22 pav.), kuriose pseudoverdančiajam džiovinamų medžiagų sluoksniui sudaryti panaudojama ne tik džioviklio srauto, bet ir mechaninė vibravimo energija.

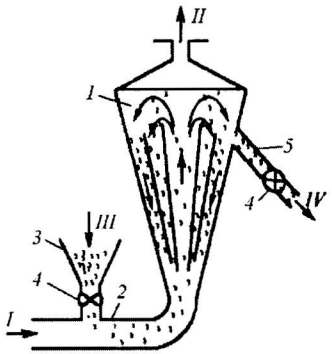


25.22 pav. Vibracinėse aeracinėse džiovyklos schema:
1 – džiovinimo kamera, *2* – skylėta dujų paskirstymo pertvara, *3* – nejudantis džiovyklos pagrindas, *4* – amortizacinės spyruoklės, *5* – vibratorius, *6* – pūtimo kamera;
I – karštas džioviklis, *II* – iš džiovyklos ištekantis agentas, *III* – džiovinamoji medžiaga, *IV* – išdžiovinta medžiaga

Džioviklio srautas tiekiamas į pūtimo kamerą *6*, iš kurios pro skylėtą pertvarą *2* kyla į džiovinimo kameros *1* viršutinę dalį, pratekėdamas pro ploną

džiovinamos medžiagos sluoksnį, tuo pačiu metu vibruojamą vibratoriumi *5*. Sluoksnelio vibravimas ne tik palengvina pseudoverdančiosios būsenos susidarymą, bet ir trukdo susidaryti džiovinamosios medžiagos gumulėliams bei tankaus sluoksnio zonoms. Tačiau tokios džiovyklos yra sudėtingesnės konstrukcijos, jas veikia vibracijos, o džiovinamų dalelių vibracijas galima sukelti tik ploname sluoksnelyje.

Aerofontaninės džiovyklos (25.23 pav.). Jos yra skirtos gana stambiems (keleto milimetrų) grūdeliams džiovinti intensyviai judančiame sraute, sunaudojant palyginti nedaug džioviklio. Pakankamu greičiu tiekiant karštą džioviklio srautą vamzdžiu *2* į kūgio pavidalo džiovinimo kameros *1* apatinę dalį sudaromas džiovinamų grūdelių srautas, fontanu iškylantis virš žiedinių pertvarų. Sunkesnių, nepakankamai išdžiūvusių grūdelių srautas už šių pertvarų krinta žemyn, lengvi išdžiūvę grūdeliai iš džiovyklos pašalinami išleidimo atvamzdžiu *5*. Sumažėjus grūdelių srauto greičiui viršutinėje dalyje, fontanu kylančiame sluoksnyje jie išbūna ilgiau nei vieną judėjimo aukštyn ir žemyn ciklą.

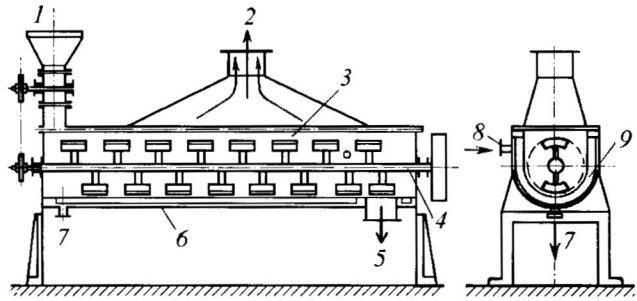


25.23 pav. Aerofontaninės džiovyklos schema:
1 – džiovinimo kamera, *2* – džioviklio tiekimo vamzdis, *3* – džiovinamosios medžiagos tiekimo bunkeris, *4* – tiektuvo sklendė, *5* – išdžiovintos medžiagos pašalinimo vamzdis; *I* – karštas džioviklis, *II* – iš džiovyklos ištekantis agentas, *III* – džiovinamoji medžiaga, *IV* – išdžiovinta medžiaga

Aerofontaninių džiovyklų džiovinimo kameros gali būti ne tik kūginės, bet ir kūginės–cilindrinės arba piramidinės formos.

Mentinės džiovyklos. Šios džiovyklos (25.24 pav.) dažnai naudojamos maisto pramonėje. Darbo kamerą sudaro lovys arba cilindras, išilgai kurio sukasi ant veleno užmautos mentės, kurių paskirtis – maišyti tiekiamą drėgną medžiagą, kad vis nauji paviršiai liestųsi su džiovikliu. Medžiaga gali būti džiovinama tiesiogiai, t. y. konvekciniu būdu, kai džioviklis (oras, dūmai) teka per darbo kamerą ir apiplauna medžiagą, arba kontaktiniu būdu, kai džioviklis (garai ir kt.) tiekiamas į šildymo gaubtą. Šio tipo džiovyklos gali būti periodi-

nio ir nuolatinio veikimo, atmosferinės ir vakuuminės. Tokių džiovyklų ilgis siekia 10 m, o plotis (skersmuo) – iki 2,5 m.

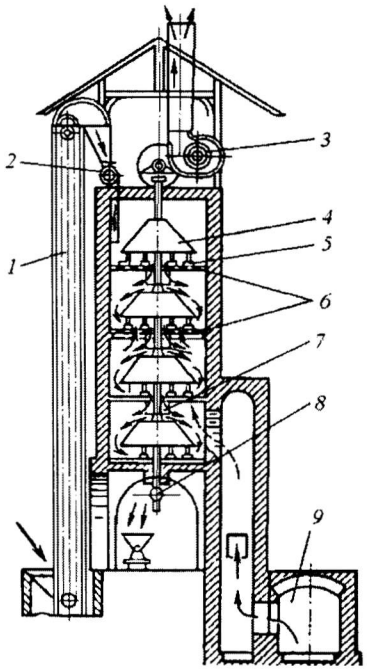


25.24 pav. Mentinės džiovyklos schema:
1 – medžiagos tiekimo bunkeris, *2* – šalinamo oro ištraukimo atvamzdis, *3* – mentinis maišiklis, *4* – maišiklio velenas, *5* – iškrovimo antgalis, *6* – lovys, *7* – kondensato išleidimo antgalis, *8* – garų tiekimo atvamzdis, *9* – šildymo gaubtas

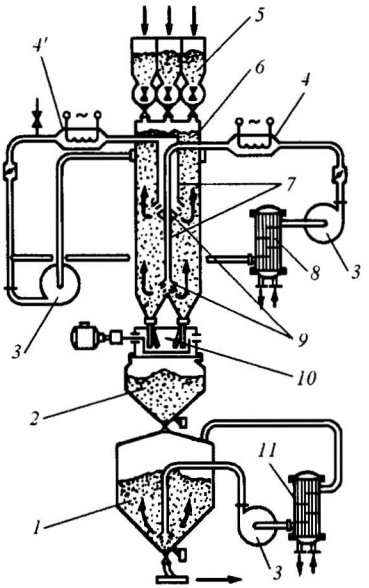
Šachtinės džiovyklos (25.25 pav.). Jos naudojamos birioms medžiagoms džiovinti. Į šią džiovyklą džiovinamoji medžiaga tiekiama elevatoriumi *1* bei tiektuvu *2* ir džiovinimo kameroje, veikiama sunkio jėgos, juda žemyn. Džiovinamosios medžiagos judėjimo žemyn greičiui sulėtinti ir džioviklio bei džiovinamosios medžiagos kontakto trukmei padidinti džiovykloje ant vertikalaus veleno yra įrengti besisukantys kūgiai *4* su grandikliais *5*, kurie stumia džiovinamąją medžiagą link centrinėje skylėtų pertvarų *6* dalyje esančios ertmės. Joje įrengtų kūginių paskirstymo elementų *7* paviršiais medžiaga nubyra ant žemiau esančių besisukančių kūgių bei skylėtų pertvarų, pro kurias iš dujų kanalo *9* iš apačios tiekiamas pašildytas džioviklis, kuris nusiurbiamas ventiliatoriumi *3*. Išdžiovinta medžiaga iš džiovyklos pašalinama iškrovimo įrenginiu *8*.

Birios grūdelių pavidalo medžiagos taip pat džiovinamos **judančiojo sluoksnio šachtinėse džiovyklose** (25.26 pav.). Į šių džiovyklų džiovinimo šachtos *6* viršutinę dalį drėgni grūdeliai tiekiami iš priėmimo bunkerių *5*. Džiovinimo šachtoje yra dvi džiovinimo zonos: viršutinė ir apatinė, į kurių centrines dalis vamzdžiais *7* pro skirstomąsias groteles *9* tolygiai tiekiamas pašildytas džioviklis. Norint geriau panaudoti jo šilumą, į apatinę džiovinimo šachtos zoną tiekiama dalis iš viršutinės džiovinimo šachtos zonos nusiurbto ir kondensatoriuje *8* nuo vandens garų atskirto bei kaloriferyje *4* pašildyto džioviklio, taigi esant dalinei panaudoto džioviklio šilumos recirkuliacijai. Į viršutinę džiovinimo šachtos zoną tiekiama likusi nusiurbto džioviklio dalis, sumaišyta su šviežiu, sausesniu aplinkos oru ir papildomai pašildyta kaloriferyje *4'*. Iš džiovyklos išdžiovinta medžiaga pašalinama pro tarpinį bunkerį *2* bei

aušinimo bunkerį *1*, į kurį dujopūte *3* uždaru ciklu tiekiamas šilumokaityje-aušintuve *11* ataušintas oras.



25.25 pav. Šachtinės džiovyklos schema: *1* – elevatorius, *2* – tiektuvas, *3* – ventiliatorius, *4* – besisukantys kūgiai, *5* – grandikliai, *6* – skylėtosios pertvaros, *7* – džiovinamosios medžiagos paskirstymo elementai, *8* – išdžiovintos medžiagos iškrovimo elementas, *9* – džioviklio kanalas

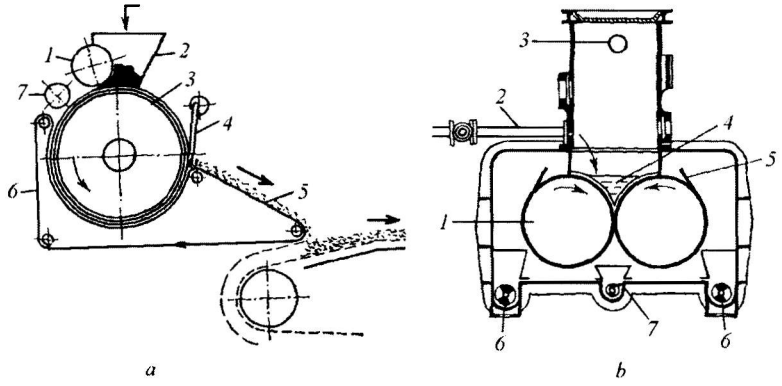


25.26 pav. Judančio sluoksnio šachtinės džiovyklos schema: *1* – aušinimo bunkeris, *2* – tarpinis bunkeris, *3* – dujopūtės, *4*, *4'* – kaloriferiai, *5* – priėmimo bunkeriai, *6* – džiovinimo kamera, *7* – džioviklio tiekimo vamzdžiai, *8* – kondensatorius, *9* – paskirstymo grotelės, *10* – tiektuvas, *11* – šilumokaitis-aušintuvas

25.9.2. Kontaktinės džiovyklos

Konvekcinėse džiovyklose šiluma džiovinamajai medžiagai perduodama nuo džioviklio – šilto oro ar dūmų, o kontaktinėse – nuo įkaitintų paviršių, prie kurių tiesiogiai liečiasi džiovinamoji medžiaga. Tokiose džiovyklose šildalas dažniausiai būna sotieji vandens garai, tačiau gali būti ir karštas vanduo arba tirpalas. Kai kuriais atvejais sienelė šildoma ir aukštojo dažnio srove. Šiluma visada perduodama per sienelę, kurios šilumos perdavimo koeficientas yra labai didelis.

Valcinės (ritininės) džiovyklos. Šios džiovyklos yra nuolatinio veikimo. Jos turi vieną arba du volus ir gali būti atmosferinės ir vakuuminės. Džiovinamąją medžiagą kontaktiniu būdu šildo iš vidaus šildomo volo paviršius. Jis gali būti šildomas sočiaisiais vandens garais, karštu vandeniu ar kitais tirpalais. Tokiose džiovyklose gali būti džiovinamos suspensijos ar pastų pavidalo medžiagos. Virš džiovinamosios medžiagos gali būti palaikomas atmosferos slėgis arba vakuumas. Vakuuminėse džiovyklose volai dedami į hermetišką korpusą, kuriame vakuumą sudaro vakuuminis siurblys. Pvz., popierius džiovinamas daugiavalcėse džiovyklose.



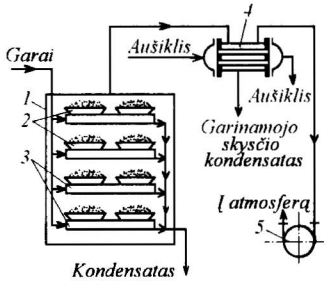
25.27 pav. Valcinių džiovyklų schemos:
a – vieno valco: *1* – spaudimo velenėlis, *2* – piltuvas, *3* – karštas volo paviršius, *4* – peilis, *5* – transporteris, *6* – prispaudimo juosta, *7* – prispaudimo velenėlis; *b* – dviejų valcų vakuuminė: *1* – ritinys (valcas), *2* – tiekimo vamzdis, *3* – vamzdis į vakuuminį siurblį, *4* – drėgna medžiaga, *5* – peiliai, *6* – sraigtai išdžiovintai medžiagai gabenti, *7* – sraigtas ištekėjusiai medžiagai surinkti

Atmosferinė vienvalcė džiovykla, skirta pastos konsistencijos medžiagoms tuo pačiu metu džiovinti ir formuoti, parodyta 25.27 pav., *a*. Džiovyklą sudaro ritinys, kurį iš vidaus šildo 0,2...0,8 MPa slėgio garai. Ritinio paviršius įkaista iki 120...150 °C. Tame paviršiuje yra 6...12 mm gylio išilginių griovelių, į kuriuos spaudimo velenėlis *1* įspaudžia iš piltuvo *2* tekančią pastą. Liesdamasi su karštu paviršiumi *3*, medžiaga greitai išdžiūsta, ir peilis *4* nuželia ją ant transporterio *5*. Kad iš džiūstančios medžiagos drėgmės susidarę vandens garai neišstumtų medžiagos iš griovelių, yra numatytas antrasis prispaudimo velenėlis *7* ir juosta *6*. Valcų sukimosi dažnis parenkamas toks, kad, velenui apsisukus vieną kartą, medžiaga pakankamai išdžiūtų. Savitosios garų sąnaudos, esant 0,6 MPa slėgiui, sudaro 1,2...1,4 kg garų (kilogramui drėgmės). Dviejų valcų nuolatinio veikimo vakuuminė džiovykla parodyta 25.27 pav., *b*. Joje džiovinamos skystos ir tirštos medžiagos, kurių negalima ilgiau laikyti aukštoje temperatūroje. Valcai yra san-

dariame gaubte, kuriame vakuuminis siurblys ir kondensatorius sudaro vakuumą. Valcai iš vidaus šildomi garais. Medžiaga patenka ant jų iš viršaus (arba valcų apatinė dalis liečia džiovinamąją medžiagą).

Vakuuminė džiovinimo kamera (25.28 pav.) yra paprasčiausia periodinio veikimo kontaktinė džiovykla. Pastaruoju metu jos plačiai taikomos džiovinti nedidelės apimties ir įvairaus asortimento dirbiniams.

Vakuuminė džiovinimo kamera sudaryta iš cilindrinės, rečiau stačiakampės formos kameros *1*, kurioje išdėstytos tuščiavidurės lentynos *3*, šildomos karštais garais. Džiovinamoji medžiaga gali būti sudėta padėkluose *2* ant lentynų. Džiovinimo metu kamera sandariai uždaroma ir vakuuminiu siurbliu *5* per kondensatorių *4* sudaromas vakuumas.

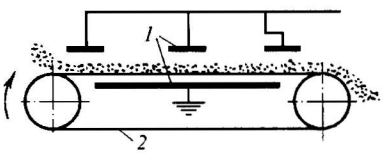


25.28 pav. Vakuuminės džiovinimo kameros schema:
1 – kamera, *2* – padėklai su medžiaga, *3* – tuščiavidurės šildomosios lentynos, *4* – kondensatorius, *5* – vakuuminis siurblys

Tokiose džiovyklose taip pat galima džiovinti lengvai užsidegančias, sprogias bei pavojingas dujas išskiriančias medžiagas. Tačiau jos yra nenašios.

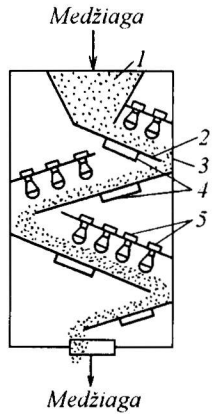
25.10.3. Specialios paskirties džiovyklos

Aukštojo dažnio srovės džiovyklos. Šios džiovyklos (25.29 pav.) naudojamos plonasieniams gaminiams džiovinti, kai reikia reguliuoti temperatūrą ir drėgmę ne tik medžiagos paviršiuje, bet ir jos vidiniuose sluoksniuose. Taip galima džiovinti medžiagas, pasižyminčias dielektrinėmis savybėmis. Nemetalinė medžiaga (dielektrikas) dedama ant transporterio *2* tarp kondensatoriaus plokštelių *1*.

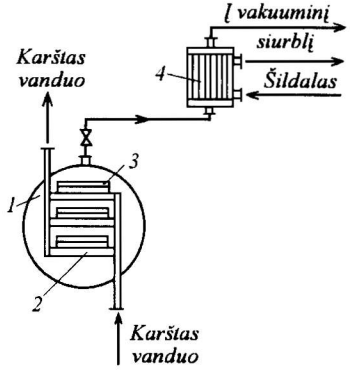


25.29 pav. Aukštojo dažnio sroves džiovyklos schema: *1* – kondensatoriaus plokštelės, *2* – begalinė juosta

Įjungus elektros lauką, pradeda intensyviai virpėti medžiagos molekulės, taigi elektros lauko energijos dalis virsta šilumine ir medžiaga greitai įšyla. Įšilimo greitis priklauso nuo elektros lauko dažnio, jo galios ir medžiagos savybių. Medžiaga džiūsta tolygiai. Energijos sąnaudos gana didelės – apie 2,0...3,5 kW·h/kg išgarinamos drėgmės.



25.30 pav. Radiacinės džiovyklos schema: *1* – medžiagos tiektuvas, *2* – nuožulnusis vibrotransporteris, *3* – korpusas, *4* – vibratorius, *5* – lempos



25.31 pav. Sublimacinės džiovyklos schema: *1* – džiovinimo kamera – sublimatorius, *2* – tuščiaviduris kūnas – plokštelė, *3* – padėklas su džiovinamąja medžiaga, *4* – kompresinis šaldymo įrenginys

Radiacinėse džiovyklose (25.30 pav.) džiovinama infraraudonaisiais spinduliais (bangos ilgis 8...10 μm), kurių energija daug didesnė už regimųjų spindulių skleidžiamą energiją. Spinduliuotės šaltinis čia būna elektros lempa arba dujų liepsna kaitinami ekranai – plokštės, pagamintos iš ugniai atsparių medžiagų (ketaus, plieno, keramikos).

Šios džiovyklos ypač tinka plonasienėms medžiagoms ir plonasienėms dangoms (dažytiems paviršiams ir pan.) džiovinti. Storesnis medžiagos sluoksnis įšyla netolygiai, t. y. paviršius įšyla daug greičiau negu vidiniai sluoksniai. Džiovinant reikia žiūrėti, kad džiovinamieji paviršiai neuždengtų vienas kito.

Džiovinimas sublimacijos būdu (25.31 pav.). Džiovinant šiuo būdu, medžiaga užšaldoma, t. y. buvusi drėgmė paverčiama kietaja faze.

Džiovinimo esmė ta, kad drėgmė, aplenkiant skystąją fazę, paverčiama garais. Šiuo atveju džiovinamosios medžiagos ir išorinio šilumos šaltinio temperatūros turi labai skirtis. Toks temperatūrų skirtumas sudaromas džiovinant užšaldytas medžiagas ir esant dideliam vakuumui. Pvz., medžiagos, užšaldytos esant -15 °C temperatūrai, džiovinamos sudarius apie 1,4 mm Hg stulpelio absoliutųjį slė-

gį, kuris atitinka su ledu pusiausvirų vandens garų slėgį. Šiomis sąlygomis medžiagoje esanti kietosios būsenos drėgmė išgaruoja. Taip džiovinant nepasikeičia medžiagos spalva, skonis, kvapas ir kitos savybės. Šis gana brangus džiovinimo būdas taikomas nepatvariems medicinos preparatams (penicilinui ir kt.) ir kai kuriems maisto produktams (žuvų apdorojimo pramonėje) džiovinti.

Sublimacinė džiovykla sudaryta iš džiovinimo kameros (sublimatoriaus) *1*, kurioje išdėstytos tuščiavidurės plokštės, ir kondensatoriaus – kompresorinio šaldymo įrenginio. Džiovinamoji medžiaga sukraunama ant padėklų, kurie pastatomi ant tuščiavidurių plokščių *2*. Padėklai turi bortelius, kuriais sudaromas oro tarpelis tarp plokštės ir padėklo paviršių. Tuščiavidurėmis plokštėmis cirkuliuoja karštas vanduo, kurio šiluma padėklui perduodama spinduliavimo būdu.

Vanduo iš džiovinamosios medžiagos pašalinamas trimis stadijomis. Pirmojoje stadijoje, gerokai sumažinus slėgį džiovinimo kameroje, medžiagoje esantis vanduo užšąla ir, panaudojant medžiagos fizikinę šilumą, ledas sublimuojamas. Šioje stadijoje iš medžiagos pašalinama iki 15 % viso joje esančio vandens kiekio. Susidarę vandens garai nusiurbiami ir patenka į kondensatorių – vamzdinį šilumokaitį, kurio tarpvamzdine ertme cirkuliuoja šaldalas – skystas amoniakas, atšaldomas cirkuliaciniame amoniako garų kompresoriniame šaldymo įrenginyje. Kondensatoriaus vamzdžiuose iš medžiagos išgaravę vandens garai kondensuojasi ir užšąla. Sublimacinėse džiovyklose yra įrengti du kondensatoriai: tuo metu, kai viename kondensatoriuje vandens garai kondensuojami ir užšaldomi, kitame ledas pašalinamas, jį atšildant. Antrojoje džiovinimo kameros darbo stadijoje – sublimacinio džiovinimo esant žemai temperatūrai ir mažam absoliučiajam slėgiui, iš medžiagos pašalinama didžioji joje esančios drėgmės dalis. Trečiojoje stadijoje – atšildant medžiagą, pasišalina likusi drėgmės dalis.

Be minėtųjų džiovyklų, chemijos pramonėje naudojama daug specialiųjų džiovyklų: turbininių, mišriųjų (pvz., valcinių-juostinių ir kt.).

25.10. Džiovyklų energinio efektyvumo padidinimo būdai

Konvekcinio džiovinimo metu dėl hidroterminės pusiausvyros susidarymo tarp džiovinamosios medžiagos ir džiovinančiosios aplinkos (karšto oro, dūmų dujų, perkaitintų garų srauto) panaudojama ne visa šildalo energija. Likusią šilumą galima rekuperuoti šiais pagrindiniais būdais: daline ištekančių dujų recirkuliacija; panaudojant tarpinį šilumnešį ir šilumokaičiais perduodant fizikinę išdžiovintos medžiagos šilumą pradiniam džiovikliui.

Šiluminis džiovyklos naudingumo koeficientas η_q išreiškiamas santykiu

$$\eta_q = \frac{Q_d}{Q_k}; \qquad (25.48)$$

čia Q_d – šilumos kiekis, džioviklio atiduotas medžiagai išdžiovinti (desorbcijos šiluma), J; Q_k – šilumos kiekis, sunaudotas džiovikliui įšildyti (kaloriferio šiluma).

Džiovyklos šilumos panaudojimo efektyvumui η_q apytiksliai nustatyti galima išreikšti temperatūrų skirtumų santykiu:

$$\eta_q = \frac{t_1 - t_2}{t_1 - t_0'}; \qquad (25.49)$$

čia t_1 – kaloriferyje pašildytų dujų temperatūra; t_2 – iš džiovyklos ištekančių dujų temperatūra; t_0' – į kaloriferį tiekiamų dėl šilumos rekuperacijos papildomai pašildytų dujų temperatūra.

Džiovinimo procese papildomai panaudojamos šilumos dalis Q_r apibūdinama rekuperacijos koeficientu

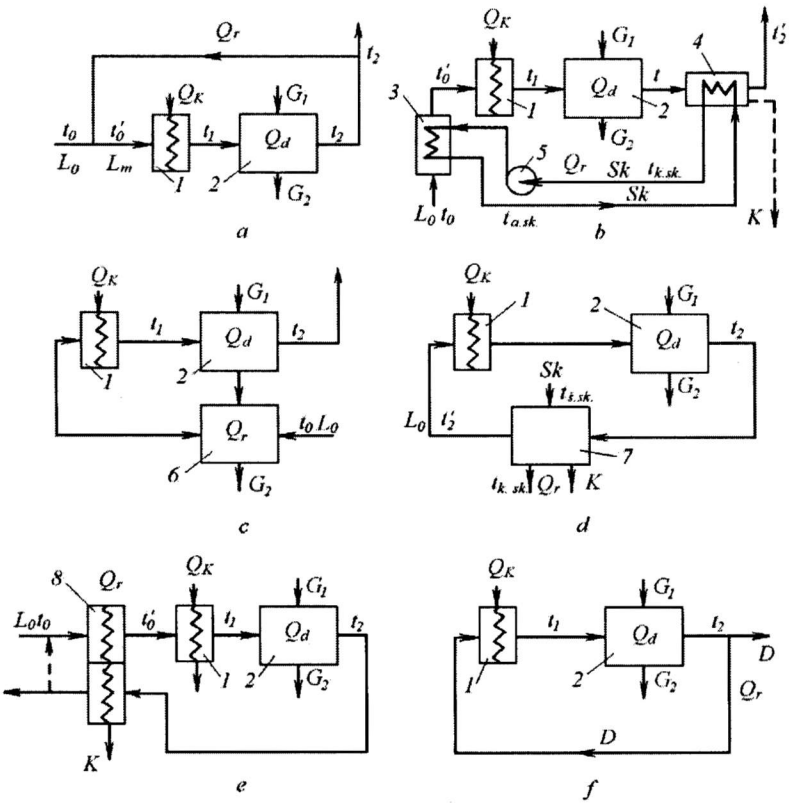
$$K_r = \frac{Q_r}{Q_b} = \frac{Q_r}{Q_k + Q_r}. \qquad (25.50)$$

Principinės džiovyklų šilumos rekuperacijos schemos pateiktos 25.32 pav.

Šilumos rekuperacijos būdas, esant dalinei panaudoto džioviklio recirkuliacijai (25.32 pav., *a*), yra nesudėtingas ir ypač tinka džiovinti termiškai stabilioms medžiagoms, kai galima naudoti aukštos temperatūros džioviklį.

Šilumos rekuperacijos, naudojant tarpinį skystą šilumnešį (25.32 pav., *b*), schemą tikslinga naudoti labai drėgnoms medžiagoms džiovinti ir kai džioviklis yra aukštos temperatūros. Pagal šią schemą skystas šilumnešis (dažniausiai vanduo) cirkuliuoja dviejuose šilumokaičiuose, įrengtuose prieš kaloriferį ir džiovinimo įrenginio gale. Atšaldant iš džiovyklos ištekančias dujas, iš medžiagos išgaravusi drėgmė kondensuojasi ir ši papildoma kondensacijos šiluma perduodama skystajam šilumnešiui, kuris pašildo į kaloriferį džiovinimui tiekiamas dujas. Šiuo atveju net esant palyginti neaukštai džiovinančiųjų dujų temperatūrai (t_1 = *150...200* °C), galima rekuperuoti iki 30 % drėgmei išgarinti panaudotos šilumos.

Šilumos rekuperacijos, panaudojant fizikinę išdžiovintos medžiagos šilumą (25.32 pav., *c*), schemą tikslinga naudoti nedidelės drėgmės medžiagoms džiovinti, kada didelė džiovinimui tiekiamos šilumos dalis panaudojama džiovinamajai medžiagai pašildyti. Kaip šilumokaičius, kurie leidžia gauti didelius išdžiovintos kietosios medžiagos ir dujinio džioviklio fazių sąlyčio paviršius, galima naudoti puraus (verdančiojo) sluoksnio arba pneumatines spiralines ir sūkurines džiovyklas, įgalinančias rekuperuoti 30...40 % šilumos.



25.32 pav. Šilumos rekuperacijos džiovyklose schemos:
a – dalinės ištekančių dujų recirkuliacijos, *b* – naudojant tarpinį skystą šilumnešį, *c* – išdžiovintos medžiagos šilumos mainų su džiovikliu, *d* – džioviklio uždaro ciklo, *e* – šilumos mainų, naudojant šiluminius vamzdžius, *f* – kaip šilumnešį naudojant perkaitintuosius vandens garus; *1* – kaloriferis, *2* – džiovykla, *3, 4* – šilumokaičiai, *5* – siurblys, *6* – dujinės ir kietosios fazės kontakto šilumokaitis, *7* – kondensatorius, *8* – šilumokaitis su šiluminiais vamzdžiais; Q_d – drėgmės išgarinimo šiluma, Q_k – kaloriferyje dujoms (orui) suteikta šiluma, Q_r – rekuperuota šiluma, L_0 – į kaloriferį pašildyti tiekiamos dujos, L_m – su rekuperuojamomis dujomis sumaišytas mišinys, S_k – skystis, G_1 – pradinė drėgna medžiaga, G_2 – išdžiovinta medžiaga, D – perkaitintieji garai, t_0 – pradinė dujų temperatūra, t_0' – papildomai pašildytų dujų temperatūra, t_1 – kaloriferyje pašildytų dujų temperatūra, t_2 – iš džiovyklos ištekančių dujų temperatūra, t_2' – šilumokaityje arba kondensatoriuje ataušintų dujų temperatūra, $t_{k.sk}$ – pašildyto skysčio temperatūra, $t_{a.sk}$ – šilumokaityje ataušusio skysčio temperatūra, $t_{š.sk}$ – šalto skysčio temperatūra

Esant uždaro ciklo šilumnešio naudojimo schemai (25.32 pav., *d*), panaudoto džioviklio šiluma perduodama vandeniui ir kondensatui, kurie priklausomai nuo kondensatoriaus tipo (sumaišymo arba paviršinis) iš kondensatoriaus *7* gali būti pašalinami atskirai arba kartu. Šis šiltas vanduo gali būti panaudotas pirminiam džiovinamosios medžiagos pašildymui bei kitiems technologiniams arba energetiniams tikslams.

Efektyvus šilumos rekuperacijos būdas – panaudoti šiluminius vamzdžius (25.32 pav., *e*). Šiluminių vamzdžių, kurie šilumokaityje *8* išdėstomi vertikaliai, viduje, jų apatinėje dalyje, vyksta išgarinimo procesai, panaudojant iš džiovyklos ištekančių dujų šilumą. Viršutinėje šiluminių vamzdžių dalyje vyksta garų kondensacija, kurios šiluma perduodama džiovikliui. Šio šilumos rekuperacijos būdo principas yra analogiškas rekuperacijos schemai su tarpiniu skystu šilumnešiu (25.32 pav., *b*), tačiau, palyginti su ja yra kompaktiškesnis, ekonomiškesnis ir gali būti naudojamas platesniame džioviklio temperatūros intervale, nes kaip darbiniai išgarinami skysčiai gali būti naudojami ne tik aukštos virimo temperatūros (vanduo, difenilas), bet ir žemos virimo temperatūros (freonai) šilumnešiai.

Maksimalios šilumos rekuperacijos galimybės pasiekiamos naudojant džiovinimui perkaitintuosius garus (25.32 pav., *f*). Džiovinant medžiagą šiuo būdu, iš jos išsiskirianti drėgmė taip pat sudaro aukštos temperatūros garus (antrinius garus), kurių temperatūra nedaug skiriasi nuo kaloriferyje pašildomų garų, todėl šiuo atveju džiovyklos šiluma panaudojama labai efektyviai (žr. (25.49) lygybę). Garų perteklių nesunku panaudoti ir technologiniams arba energetiniams tikslams.

Efektyvūs šilumos išnaudojimo ir rekuperacijos atžvilgiu yra ir šiluminiai siurbliniai įrenginiai, kurie veikia taip pat kaip kompresoriniai šaldymo įrenginiai.

Šiluminiuose siurbliuose dėl išorinės aplinkos, kuria gali būti tiek oras, tiek panaudotas iš džiovyklos ištekantis džioviklis, šilumos bei kompresoriaus mechaninės energijos džioviklio temperatūra gali būti pakeliama iki 60...80 °C. Džiovinimo įrenginiai su šiluminiais siurbliais daugiausia yra naudojami žemės ūkio produkcijai (vynuogėms, arbatai, kukurūzams ir pan.) džiovinti, tačiau jais galima efektyviai džiovinti ir chemijos pramonės produkciją.

Apskritai džiovinimo procesų energijos sąnaudų sumažinimo principai yra šie:

- maksimalus mechaninis drėgmės sumažinimas džiovinamojoje medžiagoje prieš džiovinimą;
- efektyvus džiovyklos darbo zonos tūrio panaudojimas;
- maksimalios į džiovyklą tiekiamo ir minimalios iš džiovyklos šalinamo džioviklio temperatūros;

- džioviklio recirkuliacija, uždaras jo ciklas;
- perkaitintųjų garų panaudojimas;
- išgarinamos drėgmės kondensacijos panaudojimas; šilumos rekuperatorių – šiluminių vamzdžių, šiluminių siurblių panaudojimas;
- daugiazonis džiovinimas esant tarpiniam džioviklio pašildymui;
- džiovinimo proceso suderinimas su kitais technologiniais procesais: smulkinimu, granuliavimu ir kt.

LITERATŪRA

1. **Ciparis J.** ir kt. Cheminės technologijos procesai ir aparatai. – Antras pataisytas ir papildytas leidimas. – Vilnius: Mokslas, 1984. – 473 p.
2. **Balandis A.** ir kt. Chemijos inžinerijos laboratoriniai darbai. – Kaunas: Technologija, 2003. – 148 p.
3. **Gimbutis G., Kajutis K., Krukonis V.** ir kt. Šiluminė technika. – Vilnius: Mokslas, 1993. – 333 p.
4. **Drobavičius A., Garbaravičius J., Gimbutis G.** ir kt. Bendroji šiluminė technika. – Vilnius: Mintis, 1974. – 570 p.
5. **Robert H. Perry, Cecil H. Chilton**. Chemical Engineers' Handbook. – Fifth edition. TP151. C52, 1973.
6. **Warren L. McCabe, Julian C. Smith, Peter Harriott.** Unit operations of chemical engineering. – Fourth Edition. 3 rd Printing, 1986.
7. **Perry R. H., Chilton C. H.** Chemical Engineers Handbook. – Fifth edition. TP151. C52, 1973.
8. **McCabe W. L., Smith J. C., Harriott P.** Unit operations of chemical engineering. Fourth Edition. 3 rd Printing, 1986.
9. **Coulson J. M. & Richardson J. F.** Chemical Engineering. Volume 6. Chemical Engineering design, Published 1999.
10. **Аминов М. С., Мурадов М. С., Аминова Э. М**. Процессы и аппараты пищевых производств. – Москва: Колос, 1999. – 503 с.
11. **Дытнерский Ю. И.** Процессы и аппараты химической технологии. Часть 1. – Москва: Химия, 2002. –367 с.
12. **Дытнерский Ю. И.** Процессы и аппараты химической технологии. Часть 2. – Москва: Химия, 2002. –399 с.
13. **Фролов В. Ф.** Лекции по курсу «Процессы и аппараты химической технологии»: Учебник для ВУЗОВ. – Санкт-Петербург: Химиздат, 2003. – 607 с.
14. **Пери Дж.** Справочник инженера химика. Т. 1-ый, перевод с англ. изд. – Ленинград: Химия, 1969. – 631 с.
15. **Пери Дж.** Справочник инженера химика. Т. 2-ой, перевод с англ. изд. – Ленинград: Химия, 1969. – 497 с.
16. **Чубик И. Ф., Маслов А. М.** Справочник по теплофизическим характеристикам пищевых продуктов и полуфабрикатов. – Москва: Пищевая промышленность, 1970.
17. **Общий курс процессов и аппаратов химической технологии:** Учебник для ВУЗОВ: В 2 кн. Под ред. В. Г. Айнштейна. – Москва: Лотос; Высшая школа, 2003. – Ч. 1. – 888 с.; Ч. 2. – 875 с.

DALYKINĖ RODYKLĖ

A

Absorbcija 8, 131, 185, 189, 195, 207, 227–278, 302, 315, 356, 390
- fizikinė 227, 236–238
- chemosorbcija 227, 237–238, 372
- fazių pusiausvyra 228–234
- fizikiniai pagrindai 227–228
- laipsnis 231, 235, 250
- medžiagų balansas 231–232
- principinės schemos 277–278

Absorbentas 141, 185, 227–228, 230–242, 247, 250–252, 264–265, 269, 273, 275–278, 371, 374, 390
- savitosios sąnaudos 232

Absorberiai 239–275
- darbo režimas 244–246, 254–255
- įkrovų charakteristika 247
- įkrautinės kolonos 242–252, 269–270
- lėkštinės kolonos 252–254, 271–274
- plėveliniai 239–242, 266–268
- purkštuvinės kolonos 261–264
- skaičiavimas 265–274

Absorbtyvas 185, 227, 230–251, 265, 275–277

Absorbatas 232

Adamaro lygtis 354

Adsorbcija 8, 153, 186, 316, 335, 359, 362, 371–395, 437–438, 451–452, 479
- fazių pusiausvyra 374–378
- fizikiniai pagrindai 371–374
- izotermos 375
- medžiagų balansas 378–379

Adsorbentas 186, 350, 371–391, 394
- aktyvumas 374
  - dinaminis 374
  - statinis 374

Adsorberiai 297, 342, 371, 378–381, 385–390, 394
- su stacionariu adsorbento sluoksniu 385–387
- su judančiu grūdiniu adsorbentu 388
- su pseudoverdančiuoju adsorbento sluoksniu 387
- skaičiavimas 389–390

Adsorbtyvas 186, 371–372, 374–376, 378, 385

Anijonitai 372, 392–393

Aparatai (taip pat žiūrėti pagal pavadinimą: vakuuminiai filtrai, ventiliatoriai ir kt.)
- hidraulinis pasipriešinimas 102, 111, 120, 123, 136, 178, 206–207, 241–242, 244–245, 247–248, 251, 254–255, 257–258, 260–262, 265–266, 268, 270, 272, 274, 298, 342, 385, 449, 456, 458–459, 462, 467
- užsistovėjimo zona 457, 459
- su maišikliu 400, 407, 427, 430
- su pseudoverdančiuoju sluoksniu 361, 378, 387, 389, 390–391, 400, 409, 428–429, 431–433, 512–514
- srautų pasiskirstymas 456

Apvalkaliniai šilumokaičiai 39–42, 64, 81, 92, 105, 108, 109–111

Aritmetinis temperatūrų skirtumas 92

Archimedo kriterijus 34, 63, 400

Aukštos temperatūros šildikliai 99, 155

Aušinimas 8–9, 82, 99, 120–121, 136, 259, 386, 462
- garinamasis 121

Aušinimo bokštai 120, 124

B

Balansas
- medžiagų 159, 167, 189, 191–193, 204, 212, 220, 224, 231, 251, 265, 275, 289–290, 299, 304, 310, 312, 316–317, 319–320, 322–323, 332–333, 348, 352–353, 356, 368, 378–379, 383, 389–390, 394, 403, 405, 415, 420–421, 423–424, 434, 462–464, 468, 470, 492, 494–495
- energijos (šilumos) 11–14, 17, 57, 60, 76, 86–87, 121, 123, 146, 148, 159–161, 167–168, 171, 207, 233, 305, 316–317, 415–416, 432, 476, 492, 494–498

Barbotažas 182, 210, 244, 254, 271–273, 323, 387

Bendras temperatūrų skirtumas 158, 168, 170

D

Daltono dėsnis 229–230, 282, 284

Daugkartinis garinimas 162–166, 170

Depresija 155–157, 162, 172, 179
- bendroji 157–158
- temperatūrinė 155–156, 172
- hidrostatinė 155–157, 179
- fizikinė cheminė arba koncentracijos 155
- hidraulinė 155, 157

Desorbcija 185–186, 189, 227, 230, 275–278, 363, 371, 384, 386–388, 390–391, 451, 521

Deflegmatorius 281, 289–290, 295, 297–298, 307, 309, 314, 318, 322, 358

Dėsniai:
- Daltono 229–230, 282, 284
- Fiko pirmasis ir antrasis 194, 196, 200–201, 363, 365, 451, 453
- Furjė 15, 18–21, 24, 29, 32
- Henrio 228–230, 234
- Kirchhofo 20, 32
- Lamberto 67–68
- Niutono 28
- Planko 66
- Raulio 155, 281–282, 285–287, 479
- Stefano ir Bolcmano 66, 68, 73

Diagrama (h–x) 489–494, 502–505

Distiliacija 8, 185, 189, 275, 288–293, 325, 376, 419–420, 437, 455
- frakcinė 288
- molekulinė 292–293
- paprasta 289
- su daline deflegmacija 289
- principinės schemos 289
- vandens garais 291–292

Drėgmė 104, 186, 475–486
- cheminė 478
- higroskopinė 483
- laisvoji 483
- pusiausviroji 483

Drėgnis
- medžiagos 486
- oro 488
- absoliutusis 486–488
- santykinis 486–488
- pusiausvirasis 483

Drėkinimo kampas 364, 479

Dujos:
- spinduliavimas 72–76
- spinduliuotė 64–68
- šilumos spinduliavimas 76–85

Dūmai 10, 72, 74–75, 103, 475, 489, 501, 504–507, 509, 514, 516, 520

Džiovyklos 51, 82, 487, 491–498, 501–524
- atmosferinės 506
- aukštojo dažnio srovės 518–519
- būgninės 509–510
- juostinės 508
- kamerinės 506–507
- kilpinės 508–509
- mentinės 514–515
- pneumatinės 510–511
- puraus sluoksnio 512–513
- purkštuvinės 511–512

radiacinės 519
recirkuliacinės 504, 506
sublimacinės 519–520
tunelinės 507–508
valcinės 517–518
Džiovinimas 8, 131, 186, 359, 362–363, 372, 386, 412, 475–505
diagrama h–x 489–494, 502–505
dielektriniu būdu 476
dūmais 504–505
kinetika 476, 499–501
kontaktinis 476
konvekcinis 475–476
psichrometrinė lentelė 484–485, 488
psichrometrinis skirtumas 484–485, 488
radiacinis 476
sublimacijos būdu 476
medžiagų balansas 494–499
šilumos balansas 495–499

E

Efektas 71, 134, 140, 145, 151, 243, 342, 412
pasienio sluoksnio 12, 27–29, 34, 48–49, 196, 198–200, 202–203, 359, 418
Ekstrakcija 8, 153, 186, 189, 191, 265, 325–359, 395–396, 400–410, 437, 438
fazių pusiausvyra 325–326
fizikiniai pagrindai 327–332, 334–335
medžiagų balansas 191–193, 332–333
principinės schemos 326, 358
rafinatas 325–330, 332–339, 344, 346, 348, 349–353, 356, 358, 401
binodalinė kreivė 329–330, 350
Ekstrahentas 186, 191, 325–333, 335–339, 341–343, 346, 348–358, 395, 400–401, 403–404, 408
Ekstraktyvas 185–186, 325, 327, 329, 331, 335–337, 348, 350, 352, 395–396, 401, 406
Ekstraktas 325–359, 401
Ekstrakcinė rektifikacija 286, 313
Ekstraktoriai 339–347
pakopiniai 339–340
diferencialiniai-kontaktiniai 340–347, 354
Energijos (šilumos) balansas 11–14, 17, 57, 60, 76, 86–87, 121, 123, 146, 148, 159–161, 167–168, 171, 207, 233, 305, 316–317, 415–416, 432, 476, 492, 494–498
Entalpija:
drėgno oro 487–489, 492–494, 497–498, 505
dujų 104, 145–146, 149–151
garų 14, 53, 121, 160–162, 167, 171, 416, 489, 495
kuro degimo 75, 144
masės elemento 17, 19, 30, 195, 371
šaldalo 137

F

Fazių diagrama 282, 285–286, 294, 376
Fazių inversija 244
Fiko dėsnis:
antrasis 201
pirmasis 194, 196, 200, 365, 451, 453
Frudo kriterijus 274
Furjė:
energijos pernašos dėsnis 29
kriterijus 33, 203, 368
šilumos laidumo dėsnis 15–18, 21, 24
lygtis 19–21
Furjė ir Kirchhofo lygtis 20, 32

G
Galilėjaus kriterijus 47
Garai
antriniai 154–155, 157–165, 167–168, 170–172, 179–180, 183, 416, 523
pirminiai 153, 155, 158–165, 168, 170–172, 174–175, 178, 180, 183
šildantieji 106–108, 111, 113, 180, 183, 426
Garinimas 153–184
daugkartinis 163–170
fizikiniai pagrindai 153–159
naudojant šiluminį siurblį 170–172
principinės schemos 154, 158, 162–167
vienkartinis 162–163
medžiagų balansas 159–162, 167–168
naudingasis temperatūrų skirtumas 153, 157–159, 162, 164–165, 168–170
temperatūros nuostoliai 155–158, 168
šilumos balansas 159–162, 167–168
Garintuvai:
koncentruotiems ir klampiems tirpalams garinti 177
barbotažiniai su panardintu degikliu 182
natūraliosios cirkuliacijos 173–178
naudingo temperatūrų skirtumo paskirstymas korpusuose 169–170
plėveliniai 179–181
priverstinės cirkuliacijos 178–179
su atskirai įrengta virimo zona 176–177
su atskirai įrengtu cirkuliacijos vamzdžiu 175–176
su centriniu cirkuliacijos vamzdžiu 175
su kabančiąja šildymo kamera 175
su šiluminiu siurbliu 170–172
vakuuminiai 183
Grashofo kriterijus 34–35
Grūdinis sluoksnis 378, 388
Gradientas:
koncentracijos 194–195, 366, 440
temperatūros 12, 15–16, 19, 24, 28–29, 32, 455, 499

H
Heilandto ciklas 151
Henrio dėsnis 228–230, 234
konstanta 228, 452

I, Į
Įkrova:
laisvasis tūris 244, 247
paviršius:
savitasis 212, 245–247, 269, 356
drėkinamasis 265
aktyvusis 250
Išnešimas 207, 245, 248, 273,

J
Jonų mainai 8, 186, 359, 392–394, 453–454
Juodumo laipsnis 51, 66–67, 69, 72–73, 75–76

K
Kapicos ciklas 151–152
Katijonitai 372, 392–393
Karuseliniai ekstraktoriai 408–409
Klauzijaus lygtis 58
Klodo ciklas 149–150
Koeficientai:
aktyvumo 286

molekulinės difuzijos 194–195, 200, 379, 418
šilumos, masės atidavimo 28–29, 32, 35–37, 39–43, 45–49, 52–60, 64, 76, 82–83, 94, 100–101, 103, 106, 108, 114, 120–121, 140, 170, 181, 197, 199, 204, 207, 210–211, 220, 237–238, 267, 269, 271–272, 292, 323, 334–335, 357, 360–361, 369–370, 396–397, 399, 402–403, 421
laidumo 451–452, 464
šilumos, masės perdavimo 11, 45, 78–81, 84, 86, 89, 105, 108–113, 115, 118, 120, 129, 165,170, 175–176, 178, 182, 188, 197, 207, 210–212, 215–216, 218, 220, 236–237, 242, 262, 265–267, 269, 271, 323, 334, 369–370, 384, 418, 453, 464, 516
naudingumo 13, 84–85, 94, 100, 151, 218, 221–222, 225, 266, 405–406, 425, 520

Kolonos
absorbcijos 390
ekstrakcijos 358
rektifikacijos 276, 280–281, 295–299, 305–306, 309–310, 313–316, 354, 358
įkrautinės 243–245, 278, 297
lėkštinės 252, 298, 340, 342
purkštuvinės 341

Kondensacija 8–9, 13–14, 51–55, 82, 94, 121–122, 124, 128–129, 134, 136, 136, 138–142, 156, 158–159, 161–162, 183, 281, 283, 307, 416, 430, 451, 492, 521, 523–524
lašelinė 51, 55
plėvelinė 51–52

Kondensato puodas 100–101

Kondensatoriai 122–129
barometriniai 122
laistomieji 128
natūralios cirkuliacijos oru aušinami 127
paviršiniai 125–129
plėveliniai 128
priverstinės cirkuliacijos oru aušinami 128–129
šlapieji maišymosi 122–125
sausieji maišymosi 122–125

Konvekcija 11–12, 26–32, 34–35, 46, 48–51, 76, 195–200, 203, 399, 467, 481

Kristalizatoriai:
natūraliai aušinami 427
vakuuminiai 430–432
tūriniai 427–432
paviršiniai 425–427
būgniniai 426, 430

Kūnas:
absoliučiai baltas 65
absoliučiai juodas 65–68
absoliučiai skaidrus 65
pilkas 66–67, 69

L

Labuncovo:
lygtis 58
pataisos koeficientas 53

Lakumas 228–230, 283–284, 296–297, 313, 315–320, 331, 420

Laplaso:
operatorius 19
lygtis 58

Laukas:
elektros 519
koncentracijos 402
temperatūros 14–15, 17, 19–20, 32–33

Lėkštės:
gaubtuvinės 252, 254–255, 271
tinklinės 252, 255–256, 260, 272, 274, 298, 342–345
vožtuvinės 252, 256–258, 272–274
su skysčio persipylimo lataku 252–254, 256–259
be skysčio persipylimo latako 259–261

Lygtis(ys)
diferencialinė šilumos laidumo 17–21
konvekcinės difuzijos 201, 203
molekulinės difuzijos 201, 367
šilumos mainų kriterijų 204
šilumos atidavimo 197
plokščios sluoksniuotos sienelės laidumo šilumai 22–24
cilindrinės sluoksniuotos sienelės 25–26
Furjė ir Kirchhofo 20, 32
Furjė (šilumos laidumo) 15–18, 21, 24
energijos (šilumos) balanso 11, 13–14, 17, 57, 60, 76, 87, 121, 123, 133, 148, 160–161, 167–168, 171, 207, 233, 317, 416, 496, 498
aritmetinis temperatūrų (koncentracijų) skirtumas 92
logaritminis temperatūrų (koncentracijų) skirtumas 91

M

Masės mainų aparatai 185, 188, 191, 193, 204, 206–207, 210, 212–213, 215–216, 218, 315, 472
Masės mainų procesai 8, 185, 187–189, 191–193, 202–205, 207, 229, 233, 239, 263, 279, 315, 332, 359, 370, 390, 405, 471, 480
fizikiniai pagrindai 185–189
molekulinė difuzija 194–195
skaičiavimas 206–226
varos jėga 204–206
Masės perdavimo vienetas:
aukštis 207, 213, 216, 237, 270, 341, 344
skaičius 213, 215, 265, 270–272
skaičiaus nustatymas 216–217
Medžiagų balansas 159, 167, 189, 191–193, 204, 212, 220, 224, 231, 251, 265, 275, 289–290, 299, 304, 310, 312, 316–317, 319–320, 322–323, 332–333, 348, 352–353, 356, 368, 378–379, 383, 389–390, 394, 403, 405, 415, 420–421, 423–424, 434, 462–464, 468, 470, 492, 494–495
Membraniniai procesai 8, 186, 437–474
aparatai 455–461
fizikiniai pagrindai 445–455
membranos 439–446
– difuzinės 440
– dinamiškosios 444–445
– keraminės 443
– metalinės 443
– skystosios 445
– sutankinamosios 440–443
– padengtosios 444
– porėtojo stiklo 443–444
– porėtosios 439–440
schemos 467–474
skaičiavimas 462–467
Merfrio naudingumo koeficientas 221–222, 225

N

Naudingasis temperatūrų skirtumas 153, 157–159, 162, 164–165, 168–170

O

Oro parametrai:
drėgnis 481, 487–489, 491, 494–495
absoliutusis 487
santykinis 487–488
entalpija 487–489, 492–494, 497–498, 505
rasos taškas 491–492
tankis 481, 488–489
savitoji šiluma 488–489
savitosios oro sąnaudos 494–495

P

Panašumo kriterijai:
- Archimedo 34, 63, 400
- Bio 367–368
- Eulerio 274
- Frudo 274
- Furjė 33, 203, 368
- Galilėjaus 47
- Grashofo 34–35, 400
- Nuselto 33, 35, 47, 62–63, 83, 202, 267, 334–335, 360, 367, 400,
- Peklė 33–34, 203, 272, 334
- Prandtlio 34, 36, 49, 83, 203, 334–335, 360, 418, 466
- Reinoldso 34–36, 56, 59, 268, 270, 360, 400, 418
- Pasienio sluoksnis 12, 27–29, 34, 48–49, 196, 198–200, 202–203, 359, 418
- difuzinis 196, 198, 203, 359, 418
- hidrodinaminis 27, 34, 196, 203
- šiluminis 27, 34

Permiatas 437–439, 450–451, 456–457, 462, 468–472

Procesų varos jėga 85–86, 185, 204–205: 438, 447, 450

Pseudoverdantysis sluoksnis 361, 378, 387–391, 400, 409, 428–429, 431, 433, 512–514

Psichrometrinė lentelė 484–485, 488

R

Radiacija 12

Rektifikacija 8, 153, 185, 189, 230, 263, 276, 294–324, 325, 331, 337, 354, 358, 388, 437–438, 471–472
- azeotropinė 313–315
- ekstrakcinė 313–315
- fazių pusiausvyra 281–288
- fizikiniai pagrindai 279–281
- medžiagų balansas 298–305
- principinės schemos 295–298
- proceso reguliavimas 323–324
- šilumos balansas 305–307

Rektifikacijos kolona 276, 280–281, 295–299, 305–306, 309–310, 313–316, 354, 358
- virintuvas 298
- deflegmatorius 297

Retantas 437–438, 450–451, 462, 468–470, 472

S

Savitasis paviršius 243, 245–248, 356, 369, 373, 457, 460

Separatorius 154, 159, 163, 172, 174, 175–180, 263, 336, 409, 429, 445, 511

Spinduliuotės sąvoka 68

Srautų pasiskirstymas 456

Š

Šaldalas, šaldanti medžiaga 10, 99, 131, 133–134, 136–145, 160, 520

Šaldymas 8–10, 81, 127–128, 131–152, 519–520, 523
- absorbcinis 140–142
- ežektorinis 142–143
- gilusis 132, 144–152
- gilusis didelio slėgio 151
- gilusis dvigubo droseliavimo 148–149
- gilusis kaskadinis 145
- gilusis vidutinio slėgio 149–150
- gilusis vienkartinio droseliavimo 145–147
- gilusis vienkartinio droseliavimo papildomai aušinant 147–148
- gilusis mažo slėgio 151–152
- mašininis kompresorinis 134–140
- saikingasis 132–144

Šildalas, šildantysis fluidas 10, 99, 105–107, 153–160, 164–165, 168, 170, 172, 181, 309, 320, 358, 416, 455, 462, 498, 516, 520

Šiluma:
atidavimo koeficientas 28–29, 32, 35–37, 39–42, 45–49, 52–60, 64, 76, 82–83, 94, 100–101, 103, 106, 108, 114, 120–121, 140, 170, 181, 197, 204, 267, 292
balansas 11–14, 17, 57, 60, 76, 86–87, 121, 123, 146, 148, 159–161, 167–168, 171, 207, 233, 305, 316–317, 415–416, 432, 476, 492, 494–498
perdavimo koeficientas 11, 45, 78–81, 84, 89, 105, 108–115, 118, 120, 129, 165, 170, 175–176, 178, 182, 516
Šildymas 99–120
cirkuliacinis 102–103
netiesioginis 100
tiesioginis 100
voninis 102
Šildytuvai 39, 99–113, 121, 126–127, 295, 297, 309, 358, 476, 495, 497, 501, 503, 507–509
Šilumokaičiai 105–113
apvalkaliniai 109–111
blokiniai 112–113
elementiniai 113
plokštiniai 112
spiraliniai 111–112
vamzdiniai 108–109
Šiluminė varža 22–23, 25–26, 78–79, 83
Šlapiasis termometras 481–482

T

Temperatūros depresijos (nuostoliai) 155–157, 162, 172, 179
Temperatūros gradientas 12, 15–16, 19, 24, 28–29, 32, 455, 499
Terminė varža 45
Tiščenkos lygtis 156

U

Užsistovėjimo zonos 457, 459
„Užspringimas“ 207, 241, 245, 260, 265–266, 269, 341, 355–356

V

Vakuuminiai aparatai (siurbliai, šilumokaičiai, kristalizatoriai, rektifikacijos kolonos) 122, 155, 162–163, 164, 166, 183, 277, 407, 425, 429–433, 517–518

Alfredas BALANDIS, Benonas LESKAUSKAS, Stasys ŠINKŪNAS, Giedrius VAICKELIONIS, Zenonas VALANČIUS

CHEMIJOS INŽINERIJA

II knyga

Vadovėlis aukštųjų mokyklų studentams

Redagavo P. Dastikas

Išleido leidykla „Technologija“, K. Donelaičio g. 73, 44029 Kaunas
Spausdino leidyklos „Technologija“ spaustuvė, Studentų g. 54, 51424 Kaunas